



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS -GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

ARTÊNIO CABRAL BARRETO

**USO DE SENSORIAMENTO REMOTO NA CARACTERIZAÇÃO ESPACIAL
E AMBIENTAL DA ALUVIÃO DO RIACHO SÃO JOSÉ NA BACIA SEDIMENTAR
DO CARIRI CEARENSE**

FORTALEZA

2013

ARTÊNIO CABRAL BARRETO

USO DE SENSORIAMENTO REMOTO NA CARACTERIZAÇÃO ESPACIAL E
AMBIENTAL DA ALUVIÃO DO RIACHO SÃO JOSÉ NA BACIA SEDIMENTAR DO
CARIRI CEARENSE

Dissertação submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Agrícola.

Área de concentração: Manejo e conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido.

Orientador: Prof. Luiz Alberto Ribeiro Mendonça – UFC.

FORTALEZA

2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Ciências e Tecnologia

-
- B26u Barreto, Artênio Cabral.
Uso de sensoriamento remoto na caracterização espacial e ambiental da aluvião do riacho são
josé na bacia sedimentar do cariri cearense / Artênio Cabral Barreto. – 2013.
118 f. : il. color., enc. ; 30 cm.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias,
Departamento de Engenharia Agrícola, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola,
Fortaleza, 2013.
Área de Concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido.
Orientação: Prof. Dr. Luiz Alberto Ribeiro Mendonça.
1. Bacia hidrográfica – Cariri (Ce). 2. Vulnerabilidade. 3. Planejamento agrícola – Nordeste. 4.
Águas – poluição. I. Título

CDD 630

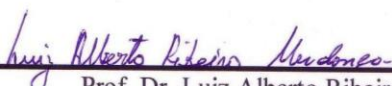
ARTÊNIO CABRAL BARRETO

USO DE SENSORIAMENTO REMOTO NA CARACTERIZAÇÃO ESPACIAL E
AMBIENTAL DA ALUVIÃO DO RIACHO SÃO JOSÉ NA BACIA SEDIMENTAR DO
CARIRI CEARENSE

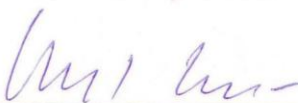
Dissertação submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido.

Aprovada em: 22 de Abril de 2013.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Luiz Alberto Ribeiro Mendonça (Orientador)
Universidade Federal do Ceará – UFC



Prof. Dr. Horst Frischkorn (Conselheiro)
Universidade Federal do Ceará – UFC



Profa. Dra. Maria Marlúcia Freitas Santiago (Conselheira)
Universidade Federal do Ceará – UFC



Profa. Dra. Renata Mendes Luna (Conselheira)
Universidade Federal do Ceará – UFC

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Maria do Socorro Cabral Barreto e Armênio Bezerra Barreto, por sempre ter apoiado as minhas decisões e acreditado nos meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ter me proporcionado saúde e força para seguir na caminhada em busca dos meus objetivos e superar as dificuldades.

Aos meus pais pela vida, educação, companheirismo, dedicação e esforço empregado durante todos esses anos. Por serem pessoas boas e cultivarem sempre o bem ao próximo.

As minhas tias, que não deixam de ser segundas mães, pelo carinho, afeto e apoio incondicional em todos os momentos. Aos meus irmãos, que são mais um motivo para a minha caminhada e todos os demais familiares que me ajudaram direta ou indiretamente.

Ao professor orientador Dr. Luiz Alberto Ribeiro Mendonça, pela orientação e conhecimento repassado, além da paciência e dedicação durante todo o decorrer da pesquisa.

Aos colegas do Departamento de Engenharia Agrícola – DENA, pela amizade e companheirismo durante esse período de mestrado.

Aos colegas do grupo de pesquisa, Kassius Vinicius de Moraes, Sávio de Brito Fontenele, Adriana Oliveira Araújo, Jônatas Pereira da Silva, Mario Renan Romão, Thayslan Renato Anchieta de Carvalho e Wendell de Melo Massaraduba, que me apoiaram nas pesquisas de campo no desenvolvimento das atividades em laboratório, além do companheirismo e amizade.

A minha namorada Lívia Batista Campos pelo carinho e dedicação, onde mesmo distante, durante esses dois anos de mestrado, foi uma companheira sem igual, sempre me apoiando e dando forças nos momentos mais difíceis.

Aos membros dos Laboratórios de Saneamento e Solos da Universidade Federal do Ceará, *campus* Cariri.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela concessão da bolsa de fomento à pesquisa.

A todos, um muito obrigado!!!!

RESUMO

BARRETO, Artênio Cabral. Universidade Federal do Ceará, Abril de 2013. **Uso de sensoriamento remoto na caracterização espacial e ambiental da aluvião do riacho são José na bacia sedimentar do cariri cearense.** Orientador: Luiz Alberto Ribeiro Mendonça. Conselheiro: Horst Frischkorn. Conselheiras: Maria Marlúcia Freitas Santiago; Renata Mendes Luna.

O Nordeste brasileiro tem como característica um alto déficit hídrico, dificultando a prática da agricultura e a manutenção do homem no campo. Nesse contexto, as áreas de aluvião se mostram como uma fonte de água que pode ser utilizada nas épocas mais secas do ano, visando a sustentabilidade da área. No entanto, para que essas áreas aluvionares sejam utilizadas de forma sustentável, se faz necessário o conhecimento de algumas características como: delimitação, capacidade de armazenamento e restrições ao uso e ocupação. O presente trabalho foi realizado na Bacia Hidrográfica do riacho São José - BHSJ, localizada na região do Cariri cearense e teve como principais objetivos: a caracterização da aluvião do riacho, a classificação da BHSJ quanto a vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas e o zoneamento agrícola da bacia. O trabalho foi dividido em quatro etapas: mapeamento das áreas de aluvião, determinação do potencial hídrico da área aluvionar onde o riacho é perene, mapeamento das classes de vulnerabilidade à poluição dos aquíferos, utilizando os índices *DRASTIC* e *DRASTIC* pesticida e o zoneamento agrícola da área da BHSJ. Em todas as etapas de desenvolvimento do trabalho utilizou-se os *softwares* SPRING, Arcgis e Global Mapper. O método de mapeamento das áreas de aluvião que apresentou melhor resultado, foi o que considera a largura do *buffer* como uma função logarítmica da área da bacia contributiva de sedimentos a montante. As áreas contributivas de sedimentos superiores a 1.000.000 m² e com declividades médias superiores a 5%, foram condições restritivas à formação da aluvião. Na área de aluvião, onde o riacho é perene, predomina sedimentos de textura média e arenosa, com profundidade máxima de 20 m, porosidade efetiva média de 8,3% e capacidade de armazenamento de água de cerca de 498.000 m³. O índice *DRASTIC* dividiu a bacia em quatro classes de vulnerabilidade: insignificante, baixa, muito baixa e moderada, a insignificante correspondendo a cerca de 78% da área e a moderada a apenas 3%, na porção da aluvião onde o riacho é perene e onde é necessário um maior controle no uso e ocupação do solo. O *DRASTIC* pesticida dividiu a bacia em seis classes de vulnerabilidade: insignificante, muito baixa, baixa, moderada, alta e muito alta, a muito baixa corresponde a cerca de 41% da área e a moderada, a alta e a muito alta, a 7, 6 e 3% respectivamente. Essas três últimas classes correspondem a toda aluvião e nelas são importantes adoções de medidas que visem o controle do uso de pesticidas. A partir do índice *DRASTIC* pesticida e da delimitação das áreas de APPs do riacho, a BHSJ foi mapeada quanto ao planejamento agrícola, definindo-se três zonas: de proteção permanente, com restrições ao uso de pesticidas e com menores restrições.

Palavras chave: Semiárido. Vulnerabilidade a poluição. Planejamento agrícola.

ABSTRACT

BARRETO, Artênio Cabral. Universidade Federal do Ceará, Abril de 2013. **Use of remote sensing in environmental and spatial characterization of alluvial creek are José sedimentary basin in the Ceará cariri.** Orientador: Luiz Alberto Ribeiro Mendonça. Conselheiro: Horst Frischkorn. Conselheiras: Maria Marlúcia Freitas Santiago; Renata Mendes Luna.

The Brazilian northeastern region is characterized by an intense water deficit, limiting the viability of agricultural practices and limiting the land capacity to support the rural populations. In this context, the alluvial areas appear as a source of water that can be used in the drier times of the year to preserve the sustainability of the area. However, for these alluvial areas to be sustainably used, it is necessary to know some characteristics like: delimitation, storage capacity and restrictions on their use and occupation. This study was conducted at the riacho São José Basin (ou Bacia Hidrográfica do riacho São José – BHSJ) , located on the Cariri region of the Ceará state, and was mainly aimed at characterizing the alluvium of the stream, classifying the BHSJ as to its vulnerability to groundwater pollution and determining the agricultural zoning of the basin. The work was divided into four steps: (1) The mapping of the alluvial areas, (2) The determination of the water-supplying potential of the area where the alluvial stream is perennial, (3) the mapping of the classes of vulnerability to aquifer pollution, and (4) The use of the DRASTIC and pesticide DRASTIC indexes and the agricultural zoning of the BHSJ area. At all stages of work development were used the SPRING, ArcGIS and Global Mapper softwares. The most successful alluvium area mapping method was that which considered the buffer width as a logarithmic function of the upstream sediment contributing basin area. The sediment contributing areas exceeding one million square meters with average slope greater than 5% were restrictive conditions to the formation of alluvium. In the alluvium section where the stream is perennial, predominate the medium textured and sandy sediment, with a maximum depth of 20 m and an average effective porosity of 8.3% and water storage capacity of about 498,000 m³. The DRASTIC index divided the basin into four classes of vulnerability: negligible, low, very low and moderate. The insignificant class corresponds to about 78% of the area, the moderate class corresponds to only 3% of the area in the alluvium section where the stream is perennial and where it is needed greater control over the use and occupation of land. The pesticide DRASTIC index divided the basin into six classes of vulnerability: negligible, very low, low, moderate, high and very high. The very low amounts to about 41% of the area, whereas the moderate, high and very high, respectively correspond to 7, 6 and 3%. These last three classes correspond to the entire alluvium and controlling pesticide use is very important there. From the pesticide DRASTIC index and from the stream APP(*Permanent Protection Areas*) area delimitation, BHSJ was mapped as to the agricultural planning, defining three zones: (a) Permanent protection zone, (b)Restricted pesticide use zone and (c) less restricted pesticide use zone.

Keywords: Semiarid. Vulnerability to pollution. Agricultural Planning

LISTA DE FIGURA

Figura 1	Comportamento fluvial numa bacia hidrográfica.....	17
Figura 2	Localização da bacia hidrográfica do São José, com a classificação dos tipos de solo e a rede de drenagem, o Estado do Ceará com destaque para a área onde se encontra a BHSJ e mapa do Brasil em destaque o Estado do Ceará.....	32
Figura 3	Sistemas aquíferos e domínios geomorfológicos da Bacia Sedimentar do Araripe.....	33
Figura 4	<i>Buffer</i> gerado entre os pontos A e B em um trecho com um "r" de 786 m e a sua respectiva largura.....	40
Figura 5	Trado tipo holandês e tipo rosca, utilizados nas sondagens.....	42
Figura 6	Sondagens a percussão realizadas na área da aluvião.....	42
Figura 7	Picnômetros utilizados na determinação da densidade.....	43
Figura 8	Provetas utilizadas no ensaio de sedimentação.....	43
Figura 9	Peneirador mecânico utilizado no peneiramento fino.....	44
Figura 10	Camadas de solos encontradas no perfil próximo ao leito do riacho	46
Figura 11	Sondagem realizada para caracterização do material do leito do riacho.....	47
Figura 12	Localização dos pontos de sondagem e classes de solo da BHSJ.....	53
Figura 13	Representação do procedimento para determinação da condutividade hidráulica vertical.....	56
Figura 14	Medição da carga hidráulica no tubo cravado no sedimento da aluvião.....	56
Figura 15	Mapa com a rede de drenagem e a delimitação da BHSJ.....	60
Figura 16	Mapa com a divisão da BHSJ em sub-bacias.....	61
Figura 17	Área a montante de um trecho "r" e recorte do SRTM utilizado para o calculo da declividade da área.....	62
Figura 18	Delimitação das áreas de aluvião e dos neossolos flúvicos e localização das sondagens utilizadas na definição da largura "real" da aluvião.....	63
Figura 19	Mapa com os <i>Buffers</i> criados ao longo da rede de drenagem a	65

	partir do método 1 e 2.....	
Figura 20	Mapas com os <i>buffers</i> criados ao longo da rede de drenagem a partir dos métodos 3 e 4.....	66
Figura 21	Mapa com os <i>buffers</i> criados ao longo da rede de drenagem a partir dos métodos 5 e 6.....	68
Figura 22	Mapa com as classes de declividade da BHSJ segundo classificação de Ramalho Filho e Beek (1995).....	70
Figura 23	Mapa com a extração das áreas planas dentro dos <i>buffers</i> gerados pelo método 1, com as áreas órfãs e sem as áreas órfãs e a delimitação "real" da aluvião.....	71
Figura 24	Mapa com a extração das áreas planas dentro dos <i>buffers</i> gerados pelo método 2 e delimitação "real" da aluvião.....	72
Figura 25	Mapa com a extração das áreas planas dentro dos <i>buffers</i> gerados pelos métodos 3 e 4 e a delimitação "real" da aluvião.....	73
Figura 26	Mapa com a extração das áreas planas nos <i>buffers</i> gerados pelos métodos 5 e 6 e a delimitação "real" da aluvião.....	74
Figura 27	Delimitação da área utilizada na determinação do potencial hídrico da aluvião.....	76
Figura 28	Perfis das seções transversais A-A', B-B' e C-C' utilizadas no cálculo do volume de sedimentos da aluvião.....	77
Figura 29	Perfil estratigráfico da seção B-B' apresentando a textura dos sedimentos da aluvião.....	80
Figura 30	Espacialização da profundidade do nível estático do aquífero na BHSJ e os respectivos índices <i>DRASTIC</i>	83
Figura 31	Espacialização recarga na BHSJ e os respectivos índices <i>DRASTIC</i>	86
Figura 32	Espacialização dos aquíferos na BHSJ e os respectivos índices <i>DRASTIC</i>	88
Figura 33	Espacialização dos tipos de solos na BHSJ e os respectivos índices <i>DRASTIC</i>	91
Figura 34	Espacialização das classes de declividade na BHSJ e os respectivos índices <i>DRASTIC</i>	93
Figura 35	Espacialização da zona vadosa das formações geológicas	95

	encontradas na BHSJ e os respectivos índices <i>DRASTIC</i>	
Figura 36	Espacialização do índice <i>DRASTIC</i> correspondente a condutividade hidráulica dos aquíferos da BHSJ.....	97
Figura 37	Mapa de vulnerabilidade à poluição dos aquíferos da BHSJ obtido a partir do método <i>DRASTIC</i>	98
Figura 38	Mapa de vulnerabilidade à poluição dos aquíferos da BHSJ obtido a partir do método <i>DRASTIC</i> pesticida.....	100
Figura 39	Delimitação das áreas classificadas como de alta e muito alta vulnerabilidade à poluição dos aquíferos por pesticidas, com indicação dos locais de atividades agrícolas.....	103
Figura 40	Delimitação das áreas classificadas como de moderada e alta vulnerabilidade a poluição dos aquíferos por pesticidas.....	104
Figura 41	Área de agricultura irrigada e de sequeiro identificadas nas áreas classificadas como de moderada e alta vulnerabilidade a poluição dos aquíferos por pesticidas na BHSJ.....	105
Figura 42	Áreas de Preservação Permanente do riacho São José e classes de vulnerabilidade a poluição dos aquíferos obtidas pelo índice <i>DRASTIC</i> pesticida.....	106
Figura 43	Zoneamento agrícola da BHSJ quanto ao uso de pesticidas.....	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Pesos atribuídos a cada parâmetro do índice DRASTIC.....	28
Tabela 2	Intervalos dos índices de vulnerabilidade e as respectivas classificações.....	29
Tabela 3	Características morfométricas da Bacia Hidrográfica do Riacho São José.....	35
Tabela 4	Intervalos de profundidade e os respectivos índices de avaliação....	48
Tabela 5	Intervalos de recarga e os respectivos índices de avaliação.....	50
Tabela 6	Tipos de rochas que compõem um aquífero e os respectivos índices de avaliação.....	51
Tabela 7	Tipos de solos e os respectivos índices de avaliação.....	52
Tabela 8	Classes de declividade e os respectivos índices de avaliação.....	54
Tabela 9	Materiais da zona vadosa e os respectivos índices de avaliação.....	54
Tabela 10	Intervalos de condutividade e os respectivos índices de avaliação...	55
Tabela 11	Valores das áreas S da bacia a montante e das respectivas larguras ℓ de uma seção da aluvião.....	66
Tabela 12	Valores dos logaritmos das áreas da bacia a montante e das respectivas razões entre as larguras ℓ de uma seção da aluvião e as declividades médias da bacia a montante.....	67
Tabela 13	Classes de declividade.....	69
Tabela 14	Áreas encontradas por cada metodologia de mapeamento.....	75
Tabela 15	Classe textural, macroporosidade e percentual da área do perfil.....	81
Tabela 16	Intervalos de profundidade e respectivas áreas na BHSJ.....	84
Tabela 17	Intervalos de classes de recarga anual e frequências de ocorrência.....	84
Tabela 18	Tipos de solos com as respectivas texturas e índices <i>DRASTIC</i>	89
Tabela 19	Tipos de solos encontrados na BHSJ e os respectivos percentuais de área.....	92
Tabela 20	Intervalos de declividade na BHSJ e respectivas porcentagens de área.....	94

Tabela 21	Classes de vulnerabilidade à poluição da BHSJ obtidas a partir do método <i>DRASTIC</i> e as respectivas áreas.....	99
Tabela 22	Classes de vulnerabilidade à poluição da BHSJ obtidas a partir do método <i>DRASTIC</i> pesticida e as respectivas áreas.....	101

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA – Agência Nacional de Águas
APP – Área de Proteção Permanente
BHSJ – Bacia Hidrográfica do São José
COGERH – Companhia de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado do Ceará
CPRM – Serviço Geológico do Brasil
EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAO – Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação
FLONA – Floresta Nacional do Araripe
FUNCEME – Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
FUNCEME – Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPECE – Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará
IPLANCE – Fundação Instituto de Pesquisa e Informação do Ceará
MNE – Modelo Numérico de Elevação
MNT – Modelo Numérico do Terreno
SEV – Sondagem Elétrica Vertical
SIG – Sistema de Informações Geográficas
SR – Sensoriamento Remoto
SRTM – Missão Topográfica Radar Shuttle
UTM – Sistema Universal Transverso de Mercator

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	15
2.1 Geral	15
2.2 Específico	15
3 REVISÃO DE LITERATURA	16
3.1 Aluvião	16
3.2 Sensoriamento Remoto e SIG na análise morfométrica e ambiental	19
3.2.1 Sensoriamento Remoto	19
3.2.2 Sistemas de Informações Geográficas	20
3.4 Poluição de águas subterrâneas	24
3.4.1 Fontes de poluição de águas subterrâneas	24
3.4.2 Vulnerabilidade a poluição das águas subterrâneas	25
3.5 Planejamento para o uso e ocupação do solo	29
4 ÁREA DE ESTUDO	32
4.1 Localização	32
4.2 Geomorfologia	33
4.3 Características fisiográficas da BHSJ	34
4.4 Clima	35
4.5 Solos	36
4.6 Vegetação	37
4.7 Uso e ocupação do solo	37
4.8 Geologia	37
4.9 Recursos hídricos	38
5 METODOLOGIA	39
5.1 Mapeamento automático de aluviões utilizando SIG	39
5.1.1 Definição da rede de drenagem	39
5.1.2 Determinação da largura do <i>buffer</i>	39

5.1.3 Extração das áreas planas dentro do <i>buffer</i>	44
5.1.4 Avaliação do mapeamento automático.....	44
5.2 Determinação do potencial hídrico da aluvião	45
5.3 Mapeamento da vulnerabilidade à poluição dos aquíferos.....	47
5.3.2 DRASTIC pesticida.....	57
5.4 Planejamento do uso e ocupação do solo da BHSJ.....	58
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
6.1 Mapeamento das áreas de aluvião.....	59
6.1.1 Extração da rede de drenagem	59
6.1.2 Determinação da largura do <i>buffer</i>	60
6.1.3 Extração das áreas planas dentro do <i>buffer</i>	68
6.1.4 Avaliação do mapeamento.....	74
6.2 Potencial hídrico da aluvião	75
6.3 Vulnerabilidade a poluição	82
6.3.1 Profundidade do nível estático (D)	82
6.3.2 Recarga do aquífero (R)	84
6.3.3 Material do aquífero (A).....	87
6.3.4 Tipo de solo (S).....	89
6.3.5 Topografia (T).....	92
6.3.6 Impacto da zona vadosa (I).....	94
6.3.7 Condutividade hidráulica (C).....	96
6.3.8 Avaliação da vulnerabilidade a poluição.....	97
6.4 Planejamento agrícola dos solos da aluvião	102
7 CONCLUSÕES	108
8 RECOMENDAÇÕES:	110
REFERÊNCIAS.....	111

1 INTRODUÇÃO

O Nordeste do Brasil está situado, quase em sua totalidade, em uma região de clima Semiárido, caracterizada por um regime pluviométrico anual altamente concentrado em poucos meses do ano e altas evaporações. Esses fatores contribuem muito para a vulnerabilidade do Nordeste a períodos de escassez hídrica. Contudo, para assegurar a disponibilidade de águas superficiais e subterrâneas às gerações atuais e futuras, busca-se a utilização racional e integrada destes recursos, além do conhecimento de suas interações, disponibilidades e limitações.

A crescente demanda de água, aliada às estiagens, tem tornado a água subterrânea uma reserva estratégica, podendo influenciar decisivamente no desenvolvimento político-socioeconômico de uma região.

Neste contexto, as áreas de aluviões (Neossolos Flúvicos) são uma alternativa para as populações durante o período de escassez hídrica, pois a água armazenada no solo fica em parte protegida da alta evaporação, possibilitando a sua posterior utilização, permitindo assim a manutenção da população rural em suas localidades. As aluviões, que são caracterizadas por ter uma alta capacidade de armazenamento, são depósitos de sedimentos transportados na sua grande maioria pelos rios e depositados nas suas calhas e margens, e de serem de fácil perfuração tornando a exploração rápida e barata. Além de definirem o curso preferencial das águas superficiais e as zonas de descargas de águas subterrâneas, as aluviões também podem funcionar como zona de recarga, dependendo do nível freático do aquífero em relação à base da mesma. Estes atributos reforçam a importância da preservação e do conhecimento morfométrico e ambiental das aluviões.

Com isso têm-se as seguintes questões científicas:

- Pode-se aplicar a metodologia utilizada na caracterização espacial (largura, extensão e profundidade) de aluviões de áreas de cristalino em uma área sedimentar, com uso de sensoriamento remoto?
- Como o mapeamento dessas áreas auxiliará na implantação de medidas de controle e gestão ambiental?

Com base nessas questões científicas, tem-se a seguinte hipótese: as caracterizações morfométricas e ambientais de áreas de aluviões, com uso de sensoriamento remoto, pode auxiliar o poder público na gestão e preservação ambiental dos recursos hídricos subterrâneos.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Fazer a caracterização morfométrica e ambiental da aluvião da Bacia Hidrográfica do São José - BHSJ, região do Cariri cearense.

2.2 Especifico

- Adequar uma metodologia de mapeamento de aluviões em áreas sedimentares utilizando sensoriamento remoto;
- Determinar o potencial hídrico da aluvião a partir da morfometria definida e do atributo porosidade efetiva;
- Elaborar o mapa de vulnerabilidade à poluição dos aquíferos da bacia hidrográfica da BHSJ utilizando os índices DRASTIC e DRASTIC pesticida;
- Propor uma maneira para fazer o uso e ocupação do solo da BHSJ.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Aluvião

No Estado do Ceará, cerca de 75% da área é constituída de rochas cristalinas aflorantes ou recobertas por pequena camada de solos e 25%, de rochas sedimentares (CEARÁ, 2005). Nas áreas constituídas por rochas cristalinas ocorrem os aquíferos fissurais, que são relativamente mais pobres em águas subterrâneas, tanto do ponto de vista quantitativo quanto qualitativo, quando comparados com os aquíferos sedimentares. Nessas áreas também encontram-se as aluviões, que são rochas sedimentares consolidadas ou não que preenchem fraturas ou falhas geológicas, por onde passam rios e riachos, constituindo-se importantes aquíferos sedimentares depositados sobre as rochas cristalinas. Nas regiões sedimentares, as aluviões encontram-se nas planície aluviais e muitas vezes apresentam-se conectadas hidráulicamente com os aquíferos sedimentares sotopostos às mesmas.

Segundo Oliveira (2006) as aluviões encontram-se amplamente distribuídas em todo o Estado do Ceará. Elas são originadas pelo deslocamento ou transporte hídrico ou eólico de sedimentos, oriundos de rochas alteradas por vários processos erosivos, que são depositados às margens de rios, dando origem as várzeas ou áreas de aluvião. Nesse contexto, a formação dessas áreas se dá através do ciclo hidrossedimentológico.

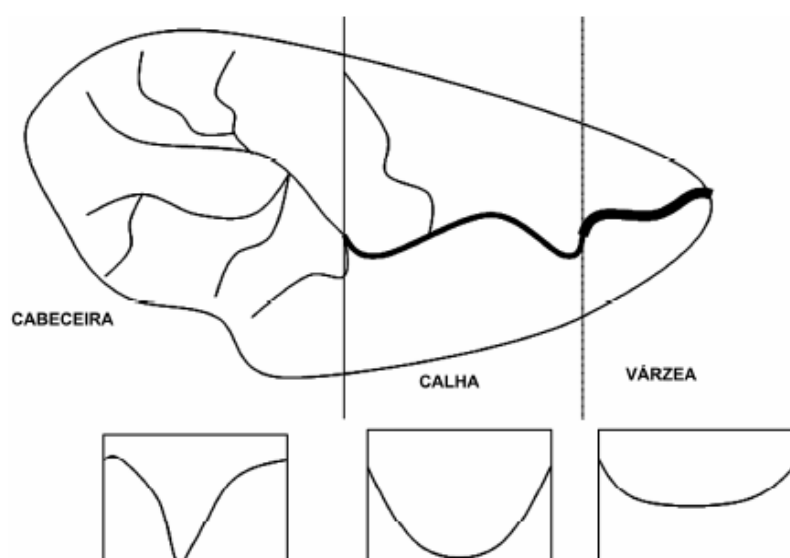
A primeira fase deste ciclo se dá através do desprendimento e transporte de partículas de solos e/ ou rochas que sofreram impacto de gotas de chuvas. Nesse processo, o transporte se dá através do escoamento superficial que é produzido por chuvas de intensidades acima da capacidade de infiltração básica de solos cuja umidade encontra-se acima da capacidade de campo (BORDAS & SEMMELMANN 2001). Em áreas de baixa declividade, conhecidas como áreas de escoamentos lenticos, as partículas em suspensão precipitam sob a ação da gravidade, depositando-se no leito dos canais de escoamento. Muitas vezes essas partículas depositadas ainda sofrem transporte por arraste. As deposições sucessivas no leito constituem a fase de assoreamento. O ciclo hidrossedimentológico é finalizado pelo processo de consolidação dos sedimentos depositados (PAIVA, CHAUDHRY & REIS 2004).

Segundo Bordas e Semmelmann (2001), a aluvião de um rio localizada próxima ao exutório geralmente apresenta largura maior do que as encontradas em áreas mais distantes (Figura 1). Esses autores dividiram a distribuição dos sedimentos e a trajetória do escoamento em três etapas:

- deposição do material mais grosseiro e escavação vertical profunda e estreita do leito do rio nas vertentes ou "bacias de cabeceiras", localizadas em regiões de declividades mais elevadas;
- acúmulo de água na calha do rio, porém com menor velocidade de escoamento do que na etapa anterior, caracterizando uma fase de transição em regiões de menores declividades;
- sedimentação de partículas nas várzeas ou planícies aluviais, com ligeiro assoreamento do leito do rio.

Nessa última etapa pode-se observar um grande acúmulo de material no leito, com alargamento da seção aluvionar e redução da profundidade do rio, justificando as maiores larguras nas áreas próximas ao exutório.

Figura 1 - Comportamento fluvial numa bacia hidrográfica



Fonte: (adaptado de Bordas & Semmelmann, 2001)

No Estado do Ceará as maiores ocorrências de aluviões foram observadas nos rios Jaguaribe e Banabuiú. As aluviões desses rios apresentam larguras bastante variáveis, com valor máximo em torno de 14 km para a do rio Jaguaribe, numa seção localizada a Nordeste de Russas, com espessura média de 15 m (CEARÁ, 2005). Já a maior espessura observada foi de 30 m, localizada também no rio Jaguaribe, durante escavações da barragem Castanhão (CEARÁ, 2005).

Na região do Cariri cearense as maiores ocorrências de aluviões foram encontradas nos rios Batateira (Crato) e Salamanca (Barbalha), com largura estimada entre 1 e 2 km

(VIANA, 2007). Em geral essas aluviões são oriundas do período Tércio-Quaternário e são caracterizadas por áreas úmidas e solos férteis, constituídas de sedimentos areno-argilosos de condutividade hidráulica variável de média a alta (VIANA, 2007). Essas características as tornam mais susceptíveis à exploração e a poluição dos aquíferos. Davis e de Wiest (1966), citam razões que explicam o interesse pelos aquíferos aluvionares:

- são depósitos de fácil perfuração, tornando a exploração rápida e barata, pois na região de vales os níveis piezométricos estão mais próximos à superfície e consequentemente o gasto com bombeamento é menor;
- são sedimentos de boa porosidade eficaz, além de apresentarem, em alguns casos, condutividade hidráulica maior que outras formações geológicas.

Segundo Burte (2008), as áreas de aluvião são de grande importância para a gestão dos recursos hídricos e a sustentabilidade da exploração dos aquíferos aluviais depende do monitoramento e controle. Para isso, os órgãos gestores precisam de informações para implementar ações regulatórias que possam contribuir com a implantação de projetos de exploração sustentável dessas áreas. Estas informações são adquiridas através do monitoramento ambiental da área, visando um manejo adequado, objetivando a sustentabilidade local.

Para que esse monitoramento possa ser realizado é necessário caracterizar a aluvião morfométricamente, indicando quais características as singularizam de outras unidades de paisagem, gerando mapas temáticos. Daly-Erraya (2007) indica algumas características topográficas e geomorfológicas que singularizam as aluviões dentre outras unidades de paisagens:

- associação à rede de drenagem;
- declividade fraca, associada ao mecanismo de deposição de sedimentos;
- tendência crescente da largura do pacote aluvionar de montante à jusante, em decorrência do aumento do tamanho da bacia contribuinte em termos de materiais.

Para caracterização e gestão de grandes áreas, como no caso de bacias hidrográficas, o uso das técnicas de Sensoriamento Remoto, aliadas ao uso de Sistemas de Informações Geográficas, são importantes ferramentas.

3.2 Sensoriamento Remoto e SIG na análise morfométrica e ambiental

3.2.1 Sensoriamento Remoto

Sensoriamento remoto (SR) pode ser definido como sendo a técnica que permite a aquisição de informações sobre a natureza de objetos sem contato físico com os mesmos (SWAIN & DAVIS, 1978). A obtenção dessas informações se dá por meio da análise da interação da radiação eletromagnética com os objetos da superfície terrestre, sendo que cada objeto possui uma assinatura espectral específica. Essa definição é relatada por diversos autores como sendo bastante abrangente.

Nishida (1998) define que SR pode ser entendido como o meio pelo qual os dados sobre determinado objeto, área ou fenômeno, são obtidos através de dispositivos (sensores) colocados em satélites ou aeronaves. Entretanto, Jensen (1986) enfatiza que a diferenciação do SR de outras técnicas de aquisição de dados de recursos terrestres, é à utilização de sensores que não estão em contato físico direto com o alvo sob investigação.

Nos últimos anos, o uso das técnicas de SR vem crescendo devido à necessidade de espacialização dos diversos tipos de informações e do crescente e rápido desenvolvimento da tecnologia da informação. Essas informações por sua vez, podem ser utilizadas para a recomendação de soluções para a maioria dos problemas, como os encontrados na gestão ambiental.

Burte (2008) menciona o uso dessas técnicas para inúmeras aplicações como: obter as características topográficas da bacia hidrográfica, mapear as áreas úmidas, caracterizar a hidrologia ou modelar a propagação de cheias. Além disso, permite obter dados complementares aqueles obtidos por atividade ou estações de campo.

Um exemplo de aplicação de SR se dá pela utilização do Modelo Numérico de Elevação - MNE, que entende-se como uma representação matemática computacional da distribuição de um fenômeno espacial que ocorre dentro de uma região da superfície terrestre (Câmara e Felgueiras, 2004). Os dados de um MNE são fornecidos por um conjunto de vetores x e y, definidores de uma posição no espaço, e de z, o atributo altitude associado a aquela posição, podendo estas informações serem extraídas do *Shuttle Radar Topography Mission* – SRTM.

O processo de geração de um MNE pode ser dividido em três etapas: aquisição dos dados ou amostragem, geração do modelo propriamente dito e a utilização do modelo (Felgueiras, 1999).

Esse método foi descrito por Curie et al. (2007), que utilizou produtos e métodos derivados do MNE para extrair a rede hidrográfica e caracterizar as áreas úmidas a partir de índices topográficos. Outra aplicação de SR foi feita por Oliveira (2006), utilizando imagens SPOT 5 para mapeamento automático de áreas úmidas.

3.2.2 Sistemas de Informações Geográficas

Várias definições são feitas para o SIG, assim como no SR. Segundo Câmara e Queiroz (2001), o SIG é aplicado para sistemas que realizam o tratamento computacional de dados geográficos e recuperam informações, tanto com base em características alfanuméricas, quanto através da localização espacial. Essas informações oferecem ao pesquisador uma visão privilegiada do ambiente de trabalho, com todas as informações disponíveis sobre um determinado assunto, inter-relacionadas com base no que lhes é fundamentalmente comum: a localização geográfica. Para que isto seja possível, a base cartográfica de um SIG deve estar georreferenciada, localizada no espaço, ou seja, possuir um sistema de coordenadas atrelado a um referencial geodésico, além de ser representada numa projeção cartográfica.

Burrough (1992) sugere outra definição para SIG, como sendo um conjunto poderoso de ferramentas para coletar, armazenar, recuperar, transformar e visualizar, além de manipular dados espaciais do mundo real, tendo em vista objetivos específicos. As informações podem ser organizadas nas formas de mapas, imagens, tabelas e relatórios estatísticos, combinados com uma base de dados unificada.

No entretanto, Eastman (1999) afirma que o conjunto de capacidades que compõem um SIG são a habilidade de digitalizar dados espaciais e anexar atributos às feições armazenadas, de analisar estes dados com base nestes atributos e apresentar o resultado sob forma de mapa. Esta habilidade de comparar feições diferentes com base na sua ocorrência geográfica em comum, constitui o diferencial do SIG e é possível através do processo de sobreposição de planos de informações. Com isso, pode-se ter em um plano de informação a rede de drenagem, as curvas de nível, a classificação do solo e até mesmo o uso e ocupação, mostrando quais áreas estão sendo ocupadas de uma maneira inadequada e recomendando um uso correto das mesmas.

Adicionalmente, o SIG permite obter uma grande quantidade de informações distintas, de forma a gerar conjuntos de dados compatíveis e combinados de maneira a representar os resultados sobre um mapa (FAO, 1999). Algumas das operações padrões de um SIG são:

- integração de mapas traçados em escalas diferentes, ou com projeções ou legendas distintas;
- trocas de escala, projeção, legenda, inscrições, etc;
- superposição de mapas com informações distintas de uma determinada zona para formar um novo mapa;
- criação de zonas intermediárias ou próximas, em torno das linhas ou polígonos de um mapa, podendo criar limites de áreas de preservação permanentes APP de rios, de lagos, de encosta entre outras, sendo esta operação conhecida como Buffer;
- responder perguntas de caráter espacial e informativo através de bases de dados.

Vale salientar que o SR e os SIGs são ferramentas essenciais não só no controle ambiental, mas também na reversão dos danos causados pelo homem, que muitas vezes comprometem as funções ambientais e prejudicam a própria qualidade de vida de suas populações (PINCINATO, 2005). Nesse contexto, os SIGs são ferramentas que utilizam os dados do SR.3 - Caracterização morfométrica e ambiental de aluviões.

Segundo Burte (2008), a aplicação de dados de satélites, facilmente disponíveis para o mapeamento de pequenos aquíferos aluviais, apresenta algumas dificuldades:

- adequação da resolução espacial dos dados, de alguns decímetros a vários quilômetros, à escala do sistema estudado;
- caracterização espacial dos recursos hídricos subterrâneos a partir de características da área, como, por exemplo, imagens ou dados altimétricos.

Apesar dessas dificuldades as técnicas de SR aliadas ao uso de SIGs torna possível a obtenção de dados de grandes áreas. Além disso, permitem obter dados complementares àqueles obtidos por atividades ou estações no campo, espacial e temporalmente insuficientes (CALMANT & SEYLER, 2006).

Diversos são os satélites que fornecem imagens, sendo alguns de acesso fácil e gratuito e outros pagos. As melhores imagens de fácil acesso, usadas para obtenção de dados topográficos são as do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) e a do sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), que apresentam resoluções de respectivamente 90 e 32 m. No entanto, estas resoluções podem não ser

adequadas no detalhamento de aluviões de pequenas áreas. Assim, quando existe a falta de informações em locais não amostrados e quando é inviável amostrar este espaço, torna-se necessária a estimativa das variáveis através da interpolação espacial de dados.

Burte (2008) relata que devido a complexidade da representação dos fenômenos ambientais, tratamentos estatísticos ou geo-estatísticos são, muitas vezes, necessários para obter a melhor representação possível do sistema.

Burrough (1992) diz que a interpolação é o procedimento que estima o valor de uma propriedade de um local não amostrado dentro de uma área coberta por pontos de observação conhecidos. Por exemplo, para obter uma melhor representação da variação espacial da altitude de uma área, pode ser feita uma interpolação para menores valores do pixel do SRTM, mas para isso, se faz necessário a verificação do resultado apresentado.

Alguns trabalhos já foram desenvolvidos buscando o mapeamento e avaliação do potencial hídrico das aluviões, como o realizado no trecho aluvionar do Rio Palhano, nos municípios de Morada Nova e Ibicuitinga – CE, pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), através do Departamento de Recursos Hídricos (DEHID). O estudo foi realizado através de sondagens a trado manual e sondagens elétricas verticais – SEVs. As sondagens a trado foram utilizadas para parametrizar as SEVs, possibilitando o mapeamento da aluvião tridimensionalmente (LEITE et al. 1999). Park et. al. (2007) também utilizaram sondagens a trado para uma melhor caracterização dessas áreas.

Outro estudo realizado pelo DEHID-FUNCEME foi a estimativa do potencial hidrogeológico de uma barragem subterrânea, localizada em uma região de cristalino, caracterizando o meio poroso hidraulicamente e geometricamente, além de contribuir com informações sobre o potencial hídrico da barragem (MOBUS et al., 2001).

Os métodos geofísicos se mostraram como uma ferramenta auxiliar para o mapeamento dessas áreas. As resistividades das formações rochosas variam dentro de um grande intervalo, dependendo do material, da densidade, da porosidade, da dimensão e forma dos poros, da umidade e da qualidade da água.

O processo de medição da eletroresistividade consiste em realizar em superfície uma série de medidas que permitam obter resistividades aparentes em função da linha de emissão ou outro parâmetro linear. Os pares de valores são representados graficamente numa curva que recebe o nome de curva de sondagem elétrica vertical - SEV (YAGÜE, 1983), esse método também foi utilizado por Gondin (1986), na verificação da variação da espessura de um aquífero aluvial.

As fotografias aéreas também são muito utilizadas para a caracterização hidrogeológica do pacote aluvionar. A FUNCEME (2002) utilizou fotografias aéreas pancromáticas, na escala 1:25.000, datadas de 1975, para delimitar o contorno do aluvião do rio Juazeiro, compreendido entre o Açude Angicos e a saída da última seção delimitada ao longo do rio. Nesse estudo, também eram realizadas sondagens a trado em seções transversais definidas e espaçadas a cada 500m, ao longo do trecho estudado, para uma posterior caracterização do material coletado. Sendo obtidas informações sobre profundidade, granulometria, presença de finos ou de matéria mais grosseira, cor, teor de umidade e, quando possível, composição provável e material de alteração.

No mesmo trabalho verificou-se que devido ao movimento do leito do rio, as áreas de aluvião apresentam valores de condutividade hidráulica diferentes, valores elevados no leito do rio, caracterizado por um material de granulometria grosseira e valores reduzidos nas áreas de extravasamento do leito do rio, caracterizado principalmente por material de granulometria fina.

A CPRM (1998) elaborou um relatório onde apresenta os principais projetos de mapeamento de aluviões na Região do Nordeste Oriental; com essas informações ela prevê uma melhor utilização dessas reservas hídricas subterrâneas, com relação ao aproveitamento e à proteção das águas. De acordo com esse relatório, até 1998, foram executados 28 trabalhos sobre a pesquisa e aproveitamento desses recursos, tanto por empresas privadas como por órgãos públicos.

Nesse contexto, uma técnica de mapeamento automático de aluviões, tanto para dimensionamento da reserva hídrica, quanto para a preservação desse recurso, utilizando SR e SIG, é de fundamental importância para a região do semiárido brasileiro.

Com o uso dessas ferramentas é possível ter a sobreposição de mapas com informações e assim obter resultados específicos, como por exemplo, a delimitação e o estudo de áreas mais susceptíveis à poluição.

3.4 Poluição de águas subterrâneas

3.4.1 Fontes de poluição de águas subterrâneas

Para estudar a poluição de águas se faz necessário conhecer algumas definições sobre terminologias utilizadas, como por exemplo poluição e contaminação. Segundo Nass (2002) poluição é definida como sendo uma alteração ecológica, provocada pelo homem, e que prejudique direta ou indiretamente, nossa vida ou nosso bem estar. A contaminação é a presença, num ambiente, de seres patogênicos, que provocam doenças, ou de substâncias, nocivas ao ser humano

Se comparada com as águas superficiais, as subterrâneas estão mais bem protegidas dos poluentes; porém esta proteção depende de varias características biogeoquímicas da área. Diversas são as fontes potenciais de poluição que podem atingir as águas subterrâneas e estas podem ter diversas origens. A partir das características físico-químicas das águas subterrâneas, da litologia e da posição espacial do ponto de coleta na área de estudo, pode-se determinar o tipo de fonte comprovada ou efetiva de poluição (VIANA, 2007). Nesse contexto, varias podem ser as fontes de poluição que um aquífero poderá estar submetido, tais como pontuais, lineares e difusas.

3.4.1.1 Fontes pontuais de poluição

As fontes pontuais de poluição são aquelas que atingem o aquífero através de atividades que lançam a carga poluidora de forma concentrada numa pequena superfície. Geralmente essas fontes são de fácil identificação e podem ser encontradas em áreas de atividades industriais, domésticas e de mineração, em postos de combustível, em lixões, em lagoas de estabilização, em cemitérios, etc. Estas são responsáveis por poluição altamente concentrada que se propagam no aquífero na forma de pluma (VIANA, 2007).

Como a BHSJ ainda se trata de uma área onde predomina a agricultura essa fonte de poluição não seria a principal; como a BHSJ está inserida na zona de conurbação entre as cidades de Juazeiro do Norte e Crato, futuramente pode surgir esse tipo de fonte de poluição.

3.4.1.2 Fontes lineares de poluição

Fontes lineares de poluição são aquelas provocadas pela infiltração de águas superficiais de rios e canais contaminados. Sendo que a possibilidade desta poluição ocorrer dependerá do sentido do fluxo hídrico de conexão entre o curso de água superficial e o aquífero (VIANA, 2007).

Os poluentes podem alcançar os cursos de águas superficiais por lançamento direto, precipitação ou escoamento superficial. A ausência de um sistema de coleta de esgoto adequada leva a população a lançar as águas servidas nos córregos, rios e lagoas (VIANA, 2007), contribuindo com a poluição dos cursos de águas superficiais.

3.4.1.3 Fontes difusas de poluição

A poluição proveniente de fontes difusas se caracteriza por apresentar baixa concentração e por atingir grandes áreas, tais como a disposição de esgoto e resíduos sólidos a céu aberto e as atividades agrícolas (VIANA, 2007). Nesse contexto, as atividades agrícolas tem significativa participação no processo de poluição devido à aplicação de fertilizantes e agrotóxicos que podem ser lixiviados, percolando e atingindo principalmente os aquíferos mais rasos. Segundo Barreto (2006), quando aplicados diretamente no solo os pesticidas podem ser degradados por vias químicas, fotólise ou pela ação de microrganismos.

A BHSJ se trata de uma bacia basicamente agrícola e esta possivelmente deve constituir a principal fonte de poluição da área.

3.4.2 Vulnerabilidade a poluição das águas subterrâneas

A região do Cariri Cearense apresenta uma característica diferente em relação à maior parte do estado do Ceará, pois nela predomina áreas de rochas sedimentares, que tem como característica o armazenamento de água em aquíferos de elevada permeabilidade. Por isso a água subterrânea constitui a principal fonte de abastecimento da região e as aluviões, em alguns pontos, contribuem para a realimentação dos aquíferos adjacentes.

A exemplo da região do Cariri, na BHSJ a água subterrânea é uma fonte importante para as populações ali existentes, sendo, portanto, necessário um estudo sobre a

susceptibilidade a poluição dos aquíferos dessa área, servindo de base para o gerenciamento do uso e ocupação agrícola dos solos da região.

Por apresentarem uma boa fertilidade, as áreas de aluvião são muito utilizadas nas regiões semi-áridas para o cultivo agrícola, mas com a modernização desse setor e altas produções, ocorreu um aumento do uso de pesticidas e fertilizantes, que podem contribuir com a contaminação dos aquíferos (ANA, 2005).

A contaminação dos aquíferos ocorre através da percolação de substâncias químicas aplicadas nas áreas cultivadas, principalmente quando elas são zonas de recarga (BARRETO, 2006).

Os pesticidas quando aplicados diretamente ao solo podem ser degradados por diversas vias, mas algumas moléculas podem apresentar alta persistência e permanecer no ambiente por mais tempo sem sofrer alteração.

A preocupação com a poluição dos aquíferos tem levado pesquisadores a estudar os processos associados ao transporte de poluentes. Le Grand (1964) relaciona o termo vulnerabilidade da água subterrânea à contaminação e, a partir daí, várias definições, qualificações e metodologias surgiram para estabelecer essa vulnerabilidade. Essas pesquisas contribuíram com o desenvolvimento de índices indicativos de vulnerabilidade à poluição de aquíferos.

Esses índices são muito utilizados no planejamento do uso e ocupação dos solos, notadamente em áreas agrícolas. Nesse contexto, a avaliação da vulnerabilidade é reconhecida pela sua habilidade em delinear áreas que são mais prováveis que outras de serem contaminadas (BABIKER et al., 2005). Com essa avaliação é possível construir mapas que apresentam áreas com maior ou menor sensibilidade à contaminação, tendo a finalidade de servir de instrumentos na definição de políticas públicas, tanto para o planejamento do uso e ocupação do solo, como no gerenciamento das águas subterrâneas.

Um dos métodos desenvolvidos para obtenção de índices de vulnerabilidade a poluição de aquíferos é o GOD, proposto por Foster e Hirata (1988). Esse método está baseado em apenas três informações hidrogeológicas:

- G, que define o grau de confinamento do aquífero (livre, semi confinado e confinado);
- O, que define a classe de aquífero em termos do grau de consolidação e litologia;
- D, que define a profundidade das águas subterrâneas confinadas ou livres.

Esse método destaca-se de outros pela simplicidade conceitual e de aplicação, podendo ser utilizado em regiões com escassez de informações hidrogeológicas e morfológicas.

Tavares et al. (2009) aplicaram essa metodologia em uma área da Bacia Sedimentar do Araripe restrita aos depósitos sedimentares localizados em altitudes inferiores a 900 m.

O autor utilizou dados da Companhia de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado do Ceará (COGERH) para a obtenção dos índices G e O. Para a determinação do índice D, foram utilizados dados de 231 poços localizados na área, para a aferição dos níveis estáticos em campo.

Essa mesma metodologia também foi aplicada por Ferreira (2000) no mapeamento da vulnerabilidade e riscos de poluição das águas subterrâneas de um aquífero aluvionar, localizado na região metropolitana de Campinas São Paulo. A exemplo de outras áreas sedimentares, ele verificou maior índice de vulnerabilidade do aquífero aluvionar, quando comparado com os índices dos outros aquíferos sedimentares da mesma área, mostrando uma maior susceptibilidade do mesmo à contaminação.

Outro método é o **AVI** (Índice de Vulnerabilidade de Aquífero), desenvolvido pelo National Hydrology Research Institute (NHRI) do Canadá (VAN STEMPVOORT et al., 1992 apud LEITÃO et al., 2003). Esse método baseia-se em apenas dois parâmetros hidrogeológicos:

- d, que define a espessura de cada camada sedimentar acima da zona saturada mais próxima da superfície;
- e k, que define a condutividade hidráulica estimada de cada uma dessas camadas.

Além dos métodos já descritos, ainda encontra-se o SINTACS, proposto por Civita (1994) a partir do método DRASTIC, utilizando os mesmos parâmetros.

O método DRASTIC, foi desenvolvido pela Environmental Protection Agency (EPA), dos Estados Unidos, e se destaca dentre vários outros sistemas de avaliação e mapeamento de vulnerabilidade. Ele é composto por parâmetros hidrogeológicos e morfológicos, que estão relacionados às características dos aquíferos de modo bem definido, tais como, a profundidade do lençol freático, a recarga, o material do aquífero, o tipo de solo da área, a topografia, o impacto da zona vadosa e a condutividade hidráulica do aquífero (LNEC, 2002).

O método DRASTIC foi desenvolvido para um tipo de poluente genérico, com a mesma mobilidade da água e que fosse percolado para o aquífero através da recarga (ALLER,

et al. 1987). Segundo Aller et al. (1987), esse método pode ser aplicado destacadamente em áreas onde se deve ter atenção especial quanto à preservação de aquíferos, auxiliando na definição de faixas proteção. Outra importante aplicação citada é a utilização no delineamento de áreas agrícolas, onde os pesticidas podem representar uma maior ameaça para as águas subterrâneas.

Os índices definidos por esse método são dados pela soma ponderada de sete valores que correspondem aos seguintes parâmetros ou indicadores hidrogeológicos:

- D(*Depth*), profundidade do nível estático;
- R(*Recharge*), taxa de recarga;
- A(*Aquifer*), material do aquífero;
- S(*Soil*), tipo de solo;
- T(*Topography*), topografia;
- I(*Impact*), impacto da zona vadosa;
- C(*Conductivity*), condutividade hidráulica do aquífero.

Cada um dos parâmetros DRASTIC tem um peso de avaliação variando de 1 a 5. Esses pesos refletem a importância relativa na quantificação da vulnerabilidade. A Tabela 1 mostra os pesos atribuídos a cada parâmetro do índice DRASTIC.

Tabela 1 - Pesos atribuídos a cada parâmetro do índice DRASTIC

Parâmetro	D	R	A	S	T	I	C
Peso	5	4	3	2	1	5	3

Fonte: Aller et al., 1987.

O índice final de avaliação apresenta valor mínimo de 23 e máximo de 226. A Tabela 2 apresenta os intervalos dos índices de vulnerabilidade e as respectivas classes de vulnerabilidade.

Tabela 2 - Intervalos dos índices de vulnerabilidade e as respectivas classificações

Intervalo de valores	Classificação da vulnerabilidade
< 100	insignificante
101 - 119	muito baixa
120 - 139	baixa
140 - 159	moderada
160 - 179	alta
180 - 199	muito alta
>200	extrema

Fonte:Aller et al., 1987.

Quando a principal atividade antrópica com potencial poluidor é o uso de pesticidas o índice DRASTIC sofre algumas alterações, sendo chamado de DRASTIC pesticida (Aller et al.1987). Essa novo método baseia-se nos mesmos critérios adotados pelo método convencional, modificando apenas os fatores de ponderação atribuídos ao solo (que passou de 2 para 5), topografia (de 1 para 3), impacto da zona vadosa (de 5 para 4) e condutividade hidráulica (de 3 para 2). Estas alterações estão relacionadas à maior importância da capacidade de atenuação dos pesticidas pelo solo (Aller et al. 1987).

3.5 Planejamento para o uso e ocupação do solo

Devido à problemática envolvida na poluição dos recursos hídricos, principalmente os subterrâneos, se faz necessário a elaboração de um plano de ocupação territorial que vise a proteção destes recursos, principalmente em áreas onde essa é a principal fonte de abastecimento.

Teixeira (1998) define planejamento como sendo a primeira ação administrativa para que metas possam ser alcançadas. Para Jucius e Shlender (1972), o planejamento é uma função através da qual se programa antecipadamente o trabalho que será eventualmente feito.

Hidalgo (1991) cita o planejamento ambiental como um processo político, social, econômico e tecnológico, de caráter educativo e participativo, onde líderes políticos, institucionais e comunitários, em conjunto com o Poder Público Federal, Estadual e Municipal, devem escolher as melhores alternativas para a conservação da natureza, gerando um desenvolvimento sustentável.

Almeida (1993), afirma que o planejamento ambiental não tem uma definição muito precisa, pois ora se confunde com o próprio planejamento territorial, ou é uma extensão de outros planejamentos setoriais mais conhecidos (urbanos, institucionais e administrativos), que foi acrescido de considerações ambientais.

Para que seja feito um planejamento ambiental é necessário ter a abrangência espacial deste, ou uma unidade de planejamento, que pode ser desde o território estadual inteiro, até uma pequena propriedade rural. Teixeira (1998) apresenta alguns exemplos de unidades de planejamento usadas, tais como: Estado, bacia e micro bacia hidrográfica, Região Metropolitana, Área de Proteção Ambiental, Município e até uma propriedade rural. Segundo este autor, o Sistema de Classificação de Uso do Solo, que foi apresentado em 1939 pelo serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos, foi uma das primeiras metodologias de ordenamento territorial.

Como uma bacia hidrográfica é uma área bem definida, composta por um sistema conectado de cursos de água, ela é uma importante unidade de planejamento e gestão dos recursos hídricos e do uso e ocupação do solo (OLIVEIRA, 2006), caracterizando um importante elo para o planejamento territorial ambiental.

Varias são as metodologias utilizadas para o planejamento territorial, sendo cada uma baseada em características físicas e até biológicas da área (ALMEIDA, 1993). Com base nessas metodologias de planejamento pode-se utilizar também a vulnerabilidade de uma área, a partir da qual se pode determinar as formas de uso e ocupação dos solos.

Com a possibilidade de determinação da vulnerabilidade de um aquífero através de mapas, os órgãos reguladores e planejadores podem analisar as melhores propostas de desenvolvimento e prioridades no controle da poluição e o monitoramento da sua qualidade. Segundo Robins et al. (2007), o objetivo de definir e mapear a vulnerabilidade de um aquífero é ajudar no planejamento da proteção da água subterrânea como um recurso essencial e agir como uma função para designar de zonas de proteção. Além disso esses mapas podem ser utilizados, juntamente com outras informações, no planejamento do uso e ocupação dos solos da área. Para Babiker et al. (2005), a caracterização das áreas que são mais susceptíveis à poluição constitui uma importante ferramenta para manejo dos recursos naturais e planejamento do uso e ocupação do solo.

Uma aplicação dessa ferramenta foi feita por Paralta e Francés (2000), utilizando análises físico-químicas das águas de um aquífero sedimentar associadas ao mapa de vulnerabilidade à poluição construído a partir dos modelos DRASTIC, AVI e Índice de

Susceptibilidade. A partir da análise das informações obtidas, eles identificaram a existência de uma contaminação persistente por nitrato de origem agrícola e definiram critérios para subsidiar políticas de gestão dos recursos subterrâneos da área estudada. Outro estudo realizado por Gaspar et al. (2005), avaliou o risco ambiental da aplicação de pesticidas no município de Arari, Estado do Maranhão, servindo de base para a elaboração de um programa de controle ambiental do rio Mearim.

Para ANA (2005) a questão da vulnerabilidade e proteção dos aquíferos ainda é um tema pouco explorado, necessitando ser incorporado à gestão das águas subterrâneas e ao planejamento do uso e ocupação territorial.

Nesse contexto, devido a problemática envolvida na contaminação dos recursos hídricos pelo uso de substâncias químicas, a Embrapa - Gestão Territorial desenvolveu um software para auxiliar nas avaliações de riscos ambientais pelo uso de agrotóxicos, considerando as possíveis contaminações de corpos de água superficiais e subterrâneos (Embrapa, 2013).

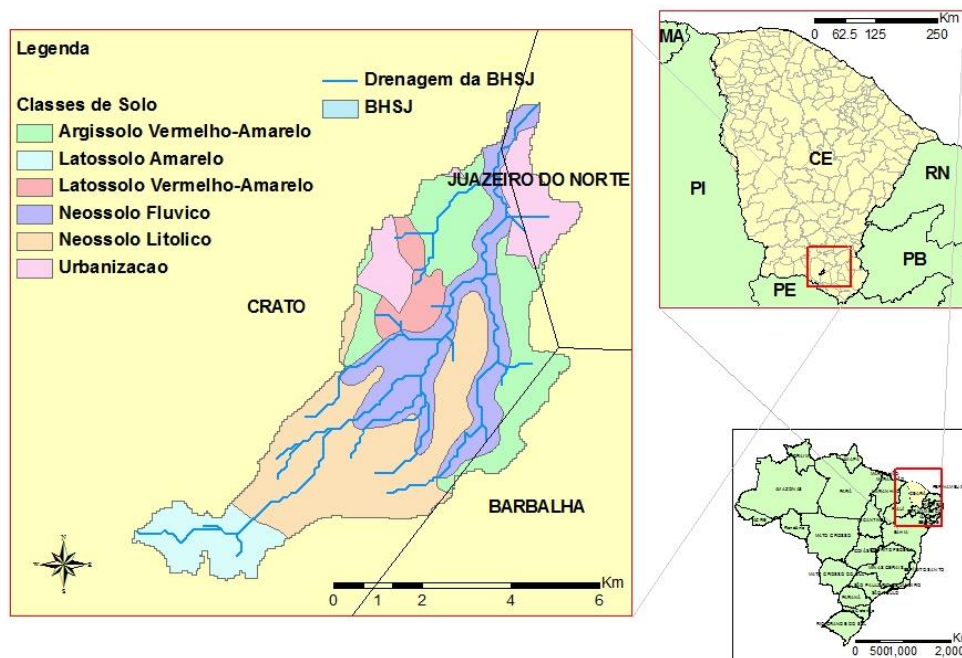
4 ÁREA DE ESTUDO

4.1 Localização

A Bacia Hidrográfica do São José (BHSJ) está localizada na parte da Bacia Sedimentar do Araripe que aflora na região do Cariri cearense, semiárido do Nordeste brasileiro. Ela engloba parte dos municípios de Crato (88,97 % da área), Juazeiro do Norte (6,73 %) e Barbalha (4,30 %) (Figura 2) e tem área de aproximadamente 41 km².

Considerando o sistema de coordenadas UTM (zona 24S, SAD-69 *datum*), a BHSJ encontra-se entre as coordenadas 9.200.000 – 9.150.000 N e 450.000 – 500.000 E, com exutório na zona de conurbação entre Juazeiro do Norte e Crato, nas coordenadas 9.201.849 N e 460.808 E.

Figura 2 - Localização da bacia hidrográfica do São José, com a classificação dos tipos de solo e a rede de drenagem, o Estado do Ceará com destaque para a área onde se encontra a BHSJ e mapa do Brasil em destaque o Estado do Ceará.



Fonte: FUNCEME (2006).

4.2 Geomorfologia

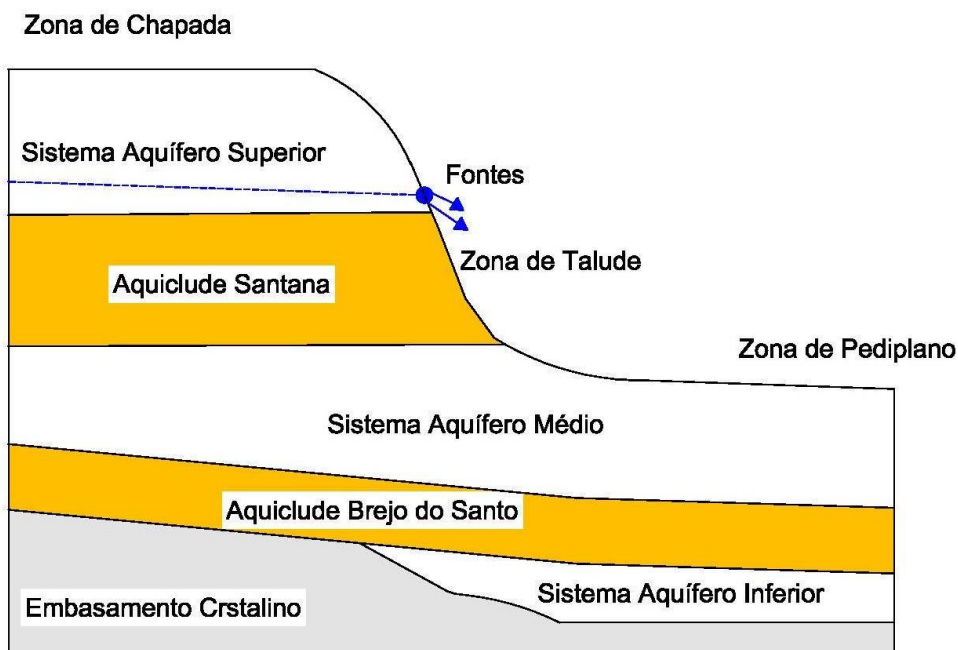
O DNPM (1996) dividiu a bacia sedimentar do Araripe em três domínios geomorfológicos: as zonas de chapada, de talude e de pediplano.

A zona de chapada, representada pela Chapada do Araripe, é a porção mais elevada da região, caracterizada pelo afloramento dos arenitos da formação Exu. Essa zona possui relevo tipicamente tabular e elevação em torno de 900 m, é limitada, em quase toda sua extensão por encostas abruptas, de contornos irregulares que chegam a ultrapassar 300 m.

A zona de talude, representada pela encosta da Chapada do Araripe e algumas regiões conhecidas popularmente como pé de serra, é a porção onde aflora as formações geológicas Santana e Arajara.

A zona de pediplano ou depressão sertaneja é a região onde aflora as demais formações geológicas que compõem a Bacia do Araripe: Rio da Batateira, Abaiara, Missão Velha, Brejo Santo e Mauriti, e é caracterizada por relevos suaves e pouco dissecados, constituídos de morros alongados entremeados por vales longos de fundo plano, com cotas médias de aproximadamente 400 metros.

Figura 3 - Sistemas aquíferos e domínios geomorfológicos da Bacia Sedimentar do Araripe.



Fonte: Adaptado de Mendonça (2001).

4.3 Características fisiográficas da BHSJ

A Tabela 3 apresenta alguns atributos fisiográficos encontrados por Costa (2013) na BHSJ que tem área de 40,88 km² e perímetro de 49,32 km. A declividade média encontrada foi de 7,9%, variando de 0%, nas áreas de pediplano e chapada, a até valores de 50 % de declividade na zona de talude. Carvalho et al. (2012) encontraram valores de declividade de 10,16%, para a bacia do rio Granjeiro, localizada próxima a BHSJ. Por isso ocorre um maior escoamento superficial e menor infiltração de água no solo, na bacia do rio Granjeiro, quando comparada a bacia do riacho São José. A declividade média da bacia, mostra-se como sendo um elemento fundamental para o planejamento do uso e ocupação do solo (TONELLO *et al.*, 2006, apud COSTA, 2013).

O baixo valor do fator de forma ($0,17 \text{ km}^{-2} \text{ km}$) e coeficiente de compacidade de 2,15, indicam que a bacia tem uma forma alongada, por isso tem-se uma menor possibilidade do acontecimento simultâneo de chuvas intensas na área (COSTA, 2013).

A bacia também apresenta significativa diferença de cotas topográficas variando de 957 m, no topo da Chapada do Araripe, a 385 m, no Vale do Cariri, próximo ao exutório, com uma cota média de 613 m (Tabela 3).

Tabela 3 - Características morfométricas da Bacia Hidrográfica do Riacho São José

Variável morfométrica	Valor	Unidade
Área da bacia	40,88	km ²
Perímetro da bacia	49,32	km
Fator de forma	0,17	km.km ⁻²
Coeficiente de compacidade	2,15	-
Declividade média da bacia	7,9	%
Declividade mínima	0	%
Declividade máxima	54	%
Número de cursos d'água	15	Unidade
Comprimento dos cursos d'água	39,43	km
Comprimento do curso d'água principal	15,27	km
Declividade média do curso d'água principal	3,77	%
Densidade de drenagem	0,96	km.km ⁻²
Confluências	12	Unidade
Razão de bifurcação	1,72	-
Coeficiente de rugosidade	7,62	-
Cota média	613	m
Cota mínima	384	m
Cota máxima	957	m

Fonte: Moraes, 2013.

4.4 Clima

Circulação atmosférica

A circulação atmosférica na Região do Cariri é regida, basicamente, por três sistemas geradores de precipitação: as Frentes Frias, com formação no pólo Sul; a Zona de Convergência Intertropical, responsável pela estação chuvosa, atuando normalmente de fevereiro a maio e; os Vórtices Ciclônicos, responsáveis pela pré-estação chuvosa, atuando normalmente de dezembro a janeiro (CEARÁ, 2005). Além desses, outros sistemas de menor

escala atuam na região, como por exemplo, o que produz as chuvas orográficas, devido às condições geomorfológicas.

Temperatura

Segundo INMET (1993) apud Mendonça (2001), a temperatura no setor oriental da Chapada do Araripe varia de uma mínima de 18°C a uma temperatura máxima de 34°C, com uma média de 25°C. Já a zona de pediplano apresenta uma temperatura média entre 24 e 26°C (TAVARES, 2009). IPLANCE (1997) cita que na zona de pediplano essa temperatura varia entre 23,5°C a 27,4°C, sendo o mês de julho o mês mais frio e o mês de novembro como o mais quente 27,4°C.

Precipitação

Na área, a precipitação média anual é de 1090,9 mm, com período chuvoso de janeiro a maio e seco de junho a novembro (COSTA 2013), o autor analisando dados de três pluviômetros na bacia, dos meses de setembro a novembro de 2011, verificou a existência de um gradiente de precipitação crescente de aproximadamente 20 mm km⁻¹ da zona de pediplano para a zona de encosta, caracterizando, assim, o efeito orográfico.

Classificação climática

De acordo com IPECE (2012), o clima na BHSJ é do tipo tropical quente sub-úmido, nas bordas da zona de chapada e na zona de talude e tropical quente semiárido brando na zona de pediplano. Essa classificação se deve principalmente à Chapada do Araripe, que funciona como barlavento.

4.5 Solos

Quanto aos aspectos edáficos, apesar da tipologia diversificada e expressiva variação espacial dos solos na região do Cariri, os solos da área de estudo estão divididos segundo a FUNCEME (2006), basicamente em cinco classes: Latossolos Amarelos (9,04%), Neossolos Litólicos (32,29%), Neossolos Flúvicos (22,02%), os Latossolos Vermelho-Amarelo (4,95%)

e Argissolos Vermelho-Amarelo (20,95%). Os 10,74% restantes correspondem a área urbanizada (Figura 2).

4.6 Vegetação

Quanto aos aspectos da vegetação, na vertente cearense da Zona de Chapada, encontra-se Floresta úmida semi perenifólia, com transição no sentido noroeste-sudeste para o Cerradão, Cerrado e Carrasco, parte dessa vegetação encontra-se protegida na Floresta Nacional do Araripe (FLONA) (ALENCAR, 2007). Na zona de pediplano predomina a Caatinga arbórea arbustiva ou mata seca (22,7 % da área) (MORAIS, 2013).

4.7 Uso e ocupação do solo

A zona de pediplano da BHSJ é caracterizada por áreas de atividades antrópicas com uso do solo para fins agrícolas e de pastagens (7,88 e 43,6 % da área, respectivamente), além de um crescimento urbano potencial na área de conurbação dos municípios de Juazeiro do Norte e Crato (6,65 %) (COSTA, 2013).

4.8 Geologia

Na zona de pediplano da BHSJ aflora, predominantemente, a Formação Rio da Batateira, com espessura média de 200 m, caracterizada por arenitos fluviais médios a grosseiros, variando em profundidade para arenitos médios a finos e siltitos argilosos. A base dessa formação é cimentada por camadas de folhelhos negros, orgânicos e fossilíferos (CEARÁ, 2005).

Em superfície, também estão presentes depósitos de talus e as aluviões, os depósitos de talus são formados por sedimentos oriundos das Formações Exu, Arajara e Santana que afloram na zona de talude da chapada do Araripe. As Formações Exu e Arajara são predominantemente areníticas e a Formação Santana é constituída principalmente de gipsita, calcita e folhelhos argilosos (DNPM, 1996).

Em sub superfície, mas em grandes profundidades, encontram-se as formações Missão Velha, Abaiara, Brejo Santo e Mauriti (DNPM, 1996). As Formações Abaiara, Missão

Velha e Mauriti são predominantemente areníticas e a Formação Brejo Santo é constituída predominante de rochas argiláceas.

4.9 Recursos hídricos

A BHSJ é uma das cinco sub-bacias da bacia hidrográfica do Salgado, que constituem a bacia do rio Jaguaribe, é formada por cursos de água que surgem na zona de talude da chapada do Araripe (Figura 3), é caracterizada por declividades elevadas em solo espesso e pouco permeável. Essas características condicionam uma drenagem densa e ramificada, que conduz água à zona de pediplano, onde se encontra o Vale do Cariri (ACEP, 1999). O riacho São José é o principal curso d'água dessa bacia (Figura 2) e um dos poucos que se mantém perene no vale do Cariri, drenando o aquífero Rio da Batateira.

Na Região do Cariri cearense, a água subterrânea é a principal fonte de abastecimento público e privado e encontra-se armazenada em três sistemas aquíferos: o Superior, que aflora na Zona de Chapada, drenado por centenas de fontes perenes que surgem na Zona de Talude; o Médio e o Inferior, que afloram na Zona de Pediplano, sendo o último predominantemente nas bordas da bacia sedimentar (Figura 3) (FONTENELE, 2010).

O Sistema Aquífero Superior é constituído pelas Formações Exu e Arajara; o médio, pelas formações Rio da Batateira, Abaiara e Missão Velha; e o Inferior, pela Formação Mauriti. O Sistema Aquífero Superior é separado do médio pelo aquíclode Santana, que aflora na Zona de Talude. Já o Sistema Aquífero Médio é separado do Inferior pelo aquíclode Brejo Santo, que aflora na zona de pediplano (DNPM, 1996).

5 METODOLOGIA

5.1 Mapeamento automático de aluviões utilizando SIG

No mapeamento das áreas de aluvião utilizou-se métodos automáticos e um método de identificação direta através de imagens de satélites supervisionadas em campo. Os métodos automáticos foram divididos em três etapas: definição da rede de drenagem; determinação da largura ℓ do *buffer* e; extração das áreas planas dentro de cada *buffer*.

5.1.1 Definição da rede de drenagem

A definição da rede de drenagem é essencial no processo de mapeamento, pois é a partir desta que serão conhecidas as larguras “limites” das aluviões. A rede de drenagem foi definida a partir dos dados do Modelo Numérico de Elevação – MNE do SRTM. Para uma melhor espacialização das declividades na área, procurou-se aumentar a resolução espacial do MNE, que corresponde a *pixels* de 90 m. Nesse procedimento, obteve-se *pixels* de 45 m, utilizando interpolação cúbica, com uso do *software Arcgis* (SCHAUBLE, 2004).

Após a interpolação, procedeu-se a correção de pequenas falhas nos valores de elevação do SRTM, utilizando a ferramenta *fill* do *software Arcgis*. Em seguida, determinou-se as direções de fluxo e o fluxo acumulado, através das ferramentas *flowdirection* e *flowaccumulation*, respectivamente, utilizando-se a quantidade (*trechold*) de 45 *pixels* na geração do primeiro “caminho preferencial da água”.

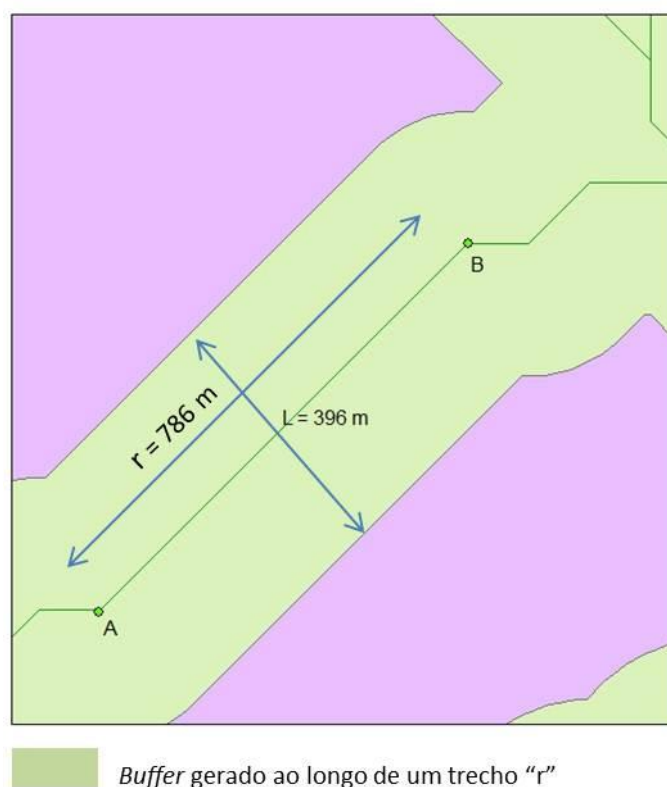
5.1.2 Determinação da largura do *buffer*

Uma das principais características das áreas de aluvião, é a proximidade da rede de drenagem, onde potencialmente pode existir planícies aluviais. Nesse contexto, áreas que não se enquadram nessa condição são descartadas. Para isso, criou-se um *buffer* de largura ℓ variável ao longo de cada trecho r da rede de drenagem extraída do MNE (Figura 4). O *buffer* foi criado através de uma operação que é realizada no SIG, onde é possível se fazer um contorno sobre uma linha, polígono ou ponto, com uma distancia fixa pré-estabelecida ou

variável, de acordo com as características a ele atribuídas. Segundo Burte (2008), a largura L do *buffer* deve ter as seguintes características:

1. ser a mínima possível, todavia suficiente para selecionar todas as aluviões; e
2. ser variável em função de características topográficas (área e declividade) da bacia a montante contributiva de água e sedimentos.

Figura 4 - *Buffer* gerado entre os pontos A e B em um trecho com um "r" de 786 m e a sua respectiva largura L



Com a criação da largura L do *buffer*, obtida através de equação empírica ajustada, obteve-se um limite máximo para as áreas de aluvião, descartando-se as demais áreas. Na BHSJ as larguras foram estimadas pela equação de melhor ajuste, dentre quatro equações: duas propostas e utilizadas por Burte (2008) (Equações 1 e 2) na aluvião da bacia do Forquilha e Vista Alegre, na região cristalina do município de Quixeramobim; e duas desenvolvidas especificamente para a BHSJ, mostradas nos resultados, em 6.1.2.

$$L = a_1 \cdot \ln(S), \quad (1)$$

Onde:

S = área da bacia a montante de cada trecho da aluvião;

a_1 = parâmetro constante a ser ajustado.

$$L = a_2 \cdot \alpha \cdot \ln(S), \quad (2)$$

Onde:

α = declividade média da bacia a montante;

a_2 = parâmetro constante a ser ajustado.

Os parâmetros a_1 e a_2 das Equações 1 e 2 foram determinados em uma única seção transversal à aluvião, onde foram obtidos os parâmetros L , S e α . A largura L foi obtida a partir de imagem de satélite supervisionada, dos limites das aluviões definidos pela FUNCEME (2006) e pelo DNPM (1996) e de análises granulométricas de sedimentos, obtidos por sondagem. Os parâmetros S e α foram determinados através dos dados do SRTM, com auxílio do *software Arcgis*.

As duas equações específicas para a BHSJ foram desenvolvidas considerando quatro seções escolhidas na área da aluvião, a partir das quais também foram determinados os parâmetros L , S e α . O parâmetro L , em cada seção, foi determinado através de imagens de satélite supervisionadas em campo. Os parâmetros S e α , referentes às bacias à montante de cada seção, foram determinados através dos dados do SRTM, com auxílio do *software Arcgis*. Uma das duas equações foi obtida ajustando-se os pontos (S , L) a uma função tipo logarítmica e a outra, ajustando os pontos ($\ln S$, L/α) a uma função linear.

Na geração dos *buffers* foram utilizadas duas condições restritivas limitantes à formação de um dado trecho de aluvião: a existência de área e declividade mínimas para a bacia contributiva de sedimentos a montante.

5.1.2.1 Análise granulométrica de sedimentos da aluvião

As amostras de sedimentos da aluvião utilizadas na análise granulométrica foram obtidas utilizando-se trados tipo holandês e tipo rosca (Figura 5) e por sondagens a percussão (Figura 6).

Figura 5 - Trado tipo holandês (A) e tipo rosca (B), utilizados nas sondagens

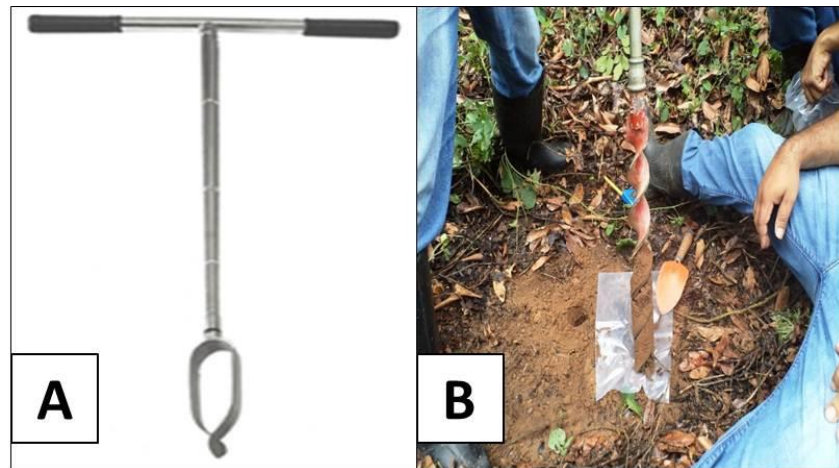


Figura 6 - Sondagens a percussão realizadas na área da aluvião



Nas análises granulométricas foram determinadas frações de areia, silte e argila, seguindo os procedimentos adotados pela norma NBR 7181 (ABNT, 1984) da Associação

Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, essas frações foram obtidas através de uma combinação de peneiramento e sedimentação, utilizando o hexametáfosfato de sódio como dispersante.

O peneiramento separou as partículas de dimensões maiores ou iguais a 0,074 mm (as que ficam retidas na peneira N° 200). A sedimentação em água destilada separou as partículas menores que 0,074 mm, que incluem o silte e a argila. As etapas adotadas na obtenção da granulometria foram: preparação da amostra; determinação da densidade real dos solos pelo método do picnômetro (Figura 7); peneiramento grosso; sedimentação (Figura 8); e peneiramento fino (Figura 9).

Figura 7 - Picnômetros utilizados na determinação da densidade



Figura 8 - Provetas utilizadas no ensaio de sedimentação



Figura 9 - Peneirador mecânico utilizado no peneiramento fino



5.1.3 Extração das áreas planas dentro do *buffer*

De acordo com as características da bacia obteve-se um valor limite de declividade utilizado na separação das áreas planas possivelmente aluvionares, onde ocorre a deposição de sedimentos, das áreas vizinhas mais íngremes, onde ocorre erosão. Um dos problemas encontrado nesse procedimento foi a precisão da grade de valores do SRTM (com *pixel* de 90 m) que induz a erros na aproximação dos desníveis em áreas de baixa declividade (GROHMANN et al., 2007). Para conhecimento das declividades nessas áreas, determinou-se cotas e coordenadas geográficas por GPS geodésico em locais de sondagens, reconhecidos como sendo áreas de aluvião.

5.1.4 Avaliação do mapeamento automático

Com o uso de imagens de satélites supervisionadas e de sondagens realizadas na área, foi possível obter uma delimitação aproximada das aluviões na BHSJ. Uma avaliação comparativa entre essa delimitação e as encontradas através das metodologias automáticas de mapeamento, permitiu uma escolha da melhor a ser utilizada.

5.2 Determinação do potencial hídrico da aluvião

Para a determinação do potencial hídrico da aluvião escolheu-se o trecho monitorado do riacho São José, próximo ao exutório, onde o mesmo ainda é perene, ele foi determinado a partir do conhecimento da capacidade máxima de armazenamento da aluvião, obtida pelo produto entre o volume dos sedimentos e a porosidade efetiva média do meio.

O volume dos sedimentos foi determinado a partir de seções transversais ao riacho, definidas através de dados do SRTM (considerando *pixels* de 45 m), associadas a imagens de satélite, utilizando-se o *software Global Mapper*. A partir dos limites da aluvião, obtidos no mapeamento, fez-se um prolongamento das retas tangentes às laterais de cada seção, até o cruzamento das mesmas, definindo os perfis de seções transversais (figura 28).

As porosidades efetivas da aluvião foram obtidas de amostras indeformadas, coletadas por trado *Uhland*, em quatro camadas de solos em um perfil próximo ao leito do riacho (Figura 10), submetidas a uma mesa tensão da marca *Eijelkamp*, com sucção de 60 cm de coluna d'água.

Figura 10 - Camadas de solos encontradas no perfil vertical próximo ao leito do riacho



A porosidade efetiva média ponderada da aluvião foi obtida tendo como peso as áreas do perfil estratigráfico da aluvião correspondentes às mesmas classes granulométricas do perfil do solo próximo ao leito do riacho (Figura 10).

O perfil estratigráfico da aluvião foi obtido através de sondagens a trado e a percussão, espaçadas em 120 m uma da outra, até uma profundidade máxima 5,30 m. As classes granulométricas do material coletado nas sondagens e no perfil próximo ao leito do riacho foram obtidas através do triângulo de grupamento textural (EMBRAPA, 2006).

Também foram realizadas sondagens a trado em quatro seções no leito do riacho, para obter uma melhor representação do local (Figura 11).

Figura 11 - Sondagem realizada para caracterização do material do leito do riacho



5.3 Mapeamento da vulnerabilidade à poluição dos aquíferos

Para o mapeamento da vulnerabilidade à poluição dos aquíferos da BHSJ foi utilizado o índice DRASTIC, que se baseia no seguinte pressuposto: que o contaminante é introduzido à superfície do terreno e é transportado verticalmente ao aquífero pela água de infiltração, com a mesma mobilidade (ALLER et al., 1987).

Neste trabalho, foi criado um mapa temático referente a cada parâmetro DRASTIC, utilizando o *software Arcgis*, o mapa de vulnerabilidade à poluição dos aquíferos da BHSJ foi elaborado utilizando o procedimento analítico que envolve o processamento de mapas digitais, através de linguagens e operadores de álgebra de mapas.

5.3.1 Obtenção dos parâmetros DRASTIC

Profundidade do nível estático – (D)

Representa a distância vertical que o contaminante deve percorrer antes de chegar ao aquífero, assim, quanto maior essa profundidade, maior será a possibilidade de atenuação do poluente, devido ao maior tempo de permanência na zona vadosa. Em aquífero livre, essa profundidade corresponde a distância ao nível freático. Em aquífero confinado, corresponde a distância ao topo do mesmo (LNEC, 2002). A Tabela 4 mostra os intervalos de profundidade e os respectivos índices de avaliação.

Tabela 4 - Intervalos de profundidade e os respectivos índices de avaliação

Profundidade do topo do aquífero (m)	Índice de avaliação
< 1,5	10
1,5 - 4,6	9
4,6 - 9,1	7
9,1 - 15,2	5
15,2 - 22,9	3
22,9 - 30,5	2
>30	1

Fonte: Aller et al., 1987.

Na BHSJ a profundidade do nível estático foi determinada espacialmente em cada *pixel* do mapa, considerando a superfície topográfica, definida pelos dados do SRTM e a superfície freática, obtida por simulação com uso do aplicativo *Modflow* por Fontenele (2010).

No aplicativo *Modflow*, a superfície freática do aquífero livre drenado pelo riacho, foi obtida através da solução numérica da Equação 3, utilizando o método das diferenças finitas, ela descreve o fluxo subterrâneo tridimensional em meio poroso saturado, heterogêneo e anisotrópico, admitindo diversas condições de contorno (FONTENELE, 2010).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W^* = S_y \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3)$$

Onde:

k_x, k_y, k_z = condutividades hidráulicas ao longo dos eixos coordenados x, y e z [$L T^{-1}$];

h = carga hidráulica [L];

S_y = produção específica do aquífero livre;

W^* = volume de água que entra ou sai no sistema por unidade de área horizontal do aquífero por unidade de tempo (condições de contorno que indicam fonte e sumidouro); e

t = tempo.

Na solução numérica da Equação 3, a área da bacia foi discretizada numa malha de 100 linhas e 100 colunas e considerou-se:

- (i) o meio homogêneo e isotrópico, com condutividade hidráulica de $1,69 \times 10^{-5}$ e porosidade efetiva ajustada de 5%;
- (ii) as condições de contorno:
 - dreno, representando o riacho, com condutância do sedimento da aluvião ajustada em $16,80 \text{ m}^2 \text{ dia}^{-1}$;
 - recarga, ajustada de acordo com as variações das cargas hidráulicas dos poços monitoradas; e

carga constante de 385,14 m próxima ao exutório (representando a carga hidráulica monitorada no rio da Batateira) e de 415,17 m, próximo à chapada
Recarga do aquífero – (R)

- (representando a carga hidráulica do aquífero a montante do exutório, estimada a partir de informações coletadas em poços da área).

A simulação que melhor representou as condições de campo foi obtida a partir do menor erro absoluto médio entre as cargas hidráulicas calculadas e observadas nos poços e entre os fluxos de base do riacho observados e calculados pelo balanço hídrico do *Modflow*.

A solução numérica da Equação 3 forneceu cargas hidráulicas espacializadas na área discretizada.

Representa a quantidade de água por unidade de área que infiltra na superfície do solo e chega até o aquífero. A recarga é responsável pelo transporte vertical do contaminante para aquífero e pela disponibilidade de água para os processos de dispersão e diluição, tanto

na zona vadosa como na zona saturada (Aller et al. 1987). Segundo Costa (2002), os processos envolvidos na recarga do aquífero são:

- Infiltração direta das águas de chuva;
- Infiltração de parte das águas escoadas nas calhas fluviais, nos trechos onde o rio é influente;
- Percolação vertical ascendente ou descendente entre aquíferos vizinhos, dependendo das cargas hidráulicas;
- Percolação por vazamentos na rede de distribuição de água, na rede coletora de esgotos e nas galerias pluviais.

A Tabela 5 mostra os intervalos de recarga anual e os respectivos índices de avaliação.

Tabela 5 - Intervalos de recarga e os respectivos índices de avaliação

Recarga do aquífero (mm/ano)	Índice de avaliação
< 51	1
51 – 102	3
102 – 178	6
178 – 254	8
>254	9

Fonte: Aller et al., 1987

Na estimativa da recarga anual utilizou-se a Equação 4 proposta por Fontenele (2010) através de correlação linear entre as recargas obtidas por simulação no *Modflow* e as respectivas precipitações acumuladas no período.

$$P = 3,544.R + 200, \text{ com } R^2 = 0,929 \quad (4)$$

Onde,

P = precipitação acumulada no período (mm. período⁻¹);

R = recarga no período (mm. período⁻¹).

Segundo Fontenele (2010), as recargas distribuídas num dado período só ocorreram nos meses cujas precipitações ultrapassaram 200 mm, corroborando com os resultados de ATEPE apud DNPM (1996), ao admitirem somente haver recarga no setor ocidental da Chapada do Araripe quando as precipitações mensais acumulam um montante superior a 200 mm.

Utilizando a Equação 4, estimou-se recargas na área a partir de precipitações mensais de 39 anos, registradas no posto pluviométrico da cidade do Crato – CE, que foi escolhido por possuir maior área de influência dentre os polígonos de Thiessen traçados na BHSJ. A recarga utilizada no DRASTIC foi a média da classe de maior frequência observada no histograma construído a partir dos valores de recarga estimados, considerando os mesmos intervalos de classes da Tabela 5.

Material do aquífero – (A)

Representa a rocha consolidada ou não consolidada que compõe o aquífero, é o material quem condiciona o fluxo de água subterrânea, determinando o tempo necessário para a ocorrência dos processos de atenuação dos poluentes (Aller, 1987). A Tabela 6 apresenta os valores de índice para diversos tipos de rochas que compõem um aquífero.

Tabela 6 - Tipos de rochas que compõem um aquífero e os respectivos índices de avaliação

Material do aquífero	Índice
Xisto argiloso; argilito.	2
Rochas metamórficas e ígnea	3
Rochas metamórficas e ígnea alterada	4
Arenito, calcário e argilito estratificado	6
Arenito maciço	6
Calcário maciço	6
Areia e cascalho	8
Basalto	9
Calcário calcificado	10

Fonte: Aller et al., 1987

A caracterização litológica do aquífero Rio da Batateira foi definida a partir de informações de perfis geológicos de poços perfurados e escavados na área e de seções transversais construídas por CEARÁ (2005) utilizando Geofísica.

A caracterização litológica do aquífero aluvionar foi definida e detalhada a partir das sondagens a trado e à percussão descritas no item 5.2.

Tipo de solo – (S)

Definido pela camada de sedimentos não consolidados localizados na porção superior da zona vadosa (Aller, 1987), essa camada é caracterizada por uma intensa atividade biológica tanto da macro quanto da microfauna edáfica. A Tabela 7 apresenta os valores de índice para diversos tipos de solos.

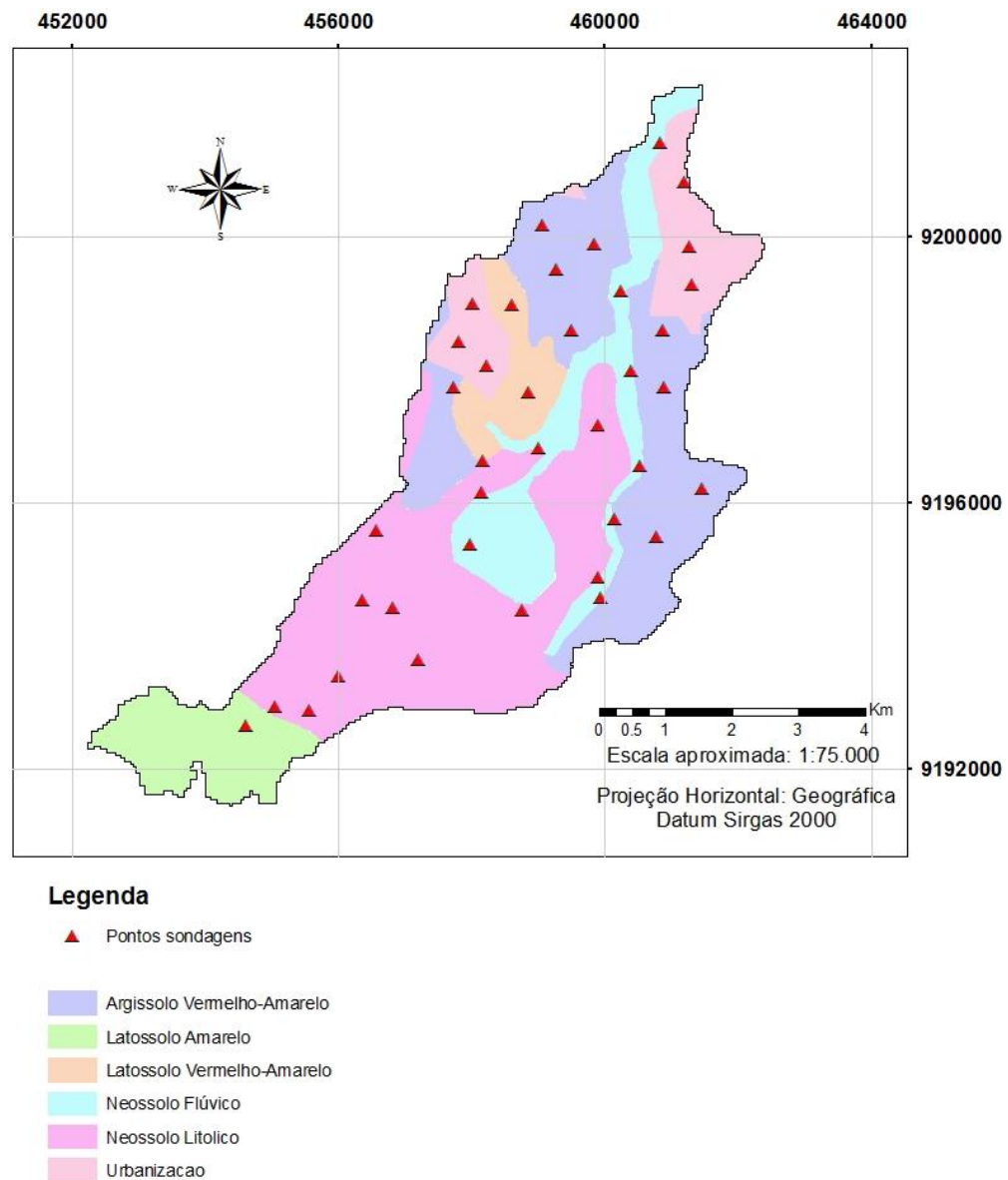
Tabela 7 - Tipos de solos e os respectivos índices de avaliação

Tipo de solo	Índice
Fino ou ausente	10
Cascalho	10
Areia	9
Turfa	8
Argila agregada ou expansível	7
Franco arenoso	6
Franco	5
Franco siltoso	4
Franco argiloso	3
Areia ou agregada e não expansível	1

Fonte: Aller et al., 1987.

As classes de solo encontradas na BHSJ foram determinadas por FUNCEME (2006). Nesse trabalho foi feita a classificação textural de todos os tipos de solos da BHSJ, a partir de amostras coletadas por sondagens distribuídas em toda a área da bacia (Figura 12).

Figura 12 - Localização dos pontos de sondagem e classes de solo da BHSJ.



Fonte: Adaptado de FUNCEME (2006)

Topografia – (T)

Representa a declividade do terreno e a variabilidade espacial da inclinação. Este parâmetro determina a probabilidade de um poluente escoar superficialmente ou de permanecer na superfície durante o tempo suficiente para se infiltrar. Aller et al. (1987) definiram para este parâmetro as classes de declividade e os respectivos índices de avaliação, conforme apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Classes de declividade e os respectivos índices de avaliação

Topografia (%)	Índice
< 2,0	10
2,0 - 6,0	9
6,0 - 12,0	5
12,0 - 18,0	3
>18	1

Fonte: Aller et al., 1987.

Para a classificação da BHSJ em classe de declividade, foram utilizados dados do SRTM interpolados para uma resolução espacial de 45m, utilizando o software Arcgis.

Impacto da zona vadosa – (I)

Representa a zona não saturada, localizada logo a baixo do solo, sobre aquíferos livres ela normalmente tem a mesma litologia (Aller, 1987). A Tabela 9 mostra os tipos de materiais da zona vadosa que têm importância nos processos de atenuação do potencial de poluição dos contaminantes e os respectivos índices de avaliação.

Tabela 9 - Materiais da zona vadosa e os respectivos índices de avaliação

Material da zona vadosa	Índice
Camada confinante	0
Argila/Silte	2 – 6 (3)
Xisto argiloso, argilito	2 – 5 (3)
Calcário	2 – 7 (6)
Arenito	4 – 8 (6)
Arenito, calcário e argilito estratificado	4 – 8 (6)
Areia e cascalho com percentagem significativa de silte e argila	4 – 8 (6)
Rochas metamórficas e ígneas	2 – 8 (4)
Areia e cascalho	6 – 9 (8)
Basalto	2 – 10 (9)
Calcário calcificado	8 – 10 (10)

Fonte: Aller et al., 1987

A classificação dos materiais constituintes da zona vadosa foi feita espacialmente, em cada *pixel* do mapa geológico da área, detalhado a partir de informações de perfis de poços, de sondagens e de trabalhos desenvolvidos por DNPM (1996) e CEARÁ (2005), nesse procedimento utilizou-se o *software Arcgis*.

Os intervalos dos valores do índice I apresentados na Tabela 9, representam variação de valores do DRASTIC que um determinado tipo de solo pode apresentar de acordo com as características do mesmo, já os valores entre parênteses são os valores padrões utilizados.

Condutividade hidráulica – (C)

Representa a facilidade de movimentação da água através da rocha, sendo, portanto, função das características do meio e do fluido. A Tabela 10 mostra as classes de condutividade hidráulica e os respectivos índices de avaliação propostos por Alleret al. (1987), de acordo com o grau de importância nos processos de atenuação do potencial de poluição.

Tabela 10 - Intervalos de condutividade e os respectivos índices de avaliação

Condutividade hidráulica do aquífero (m/d)	Índice
<4,1	1
4,1-12,2	2
12,2-28,5	4
28,5-40,7	6
40,7-81,5	8
>81,5	10

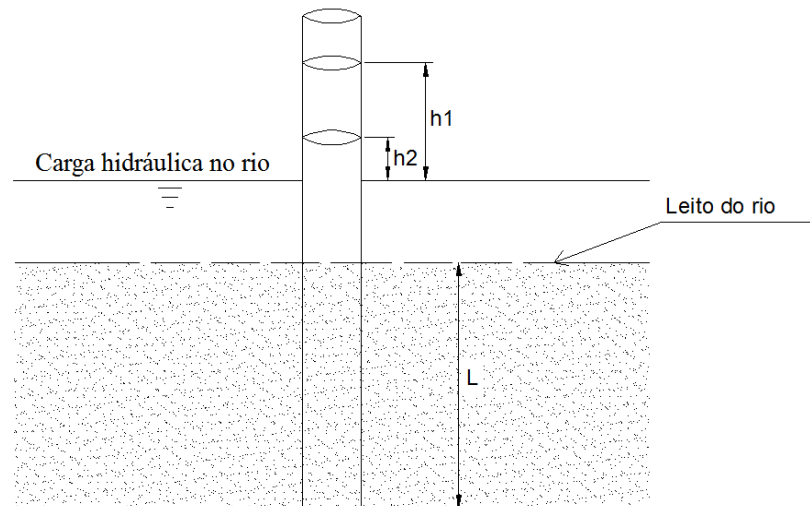
Fonte: Aller et al., 1987.

A condutividade hidráulica do aquífero Rio da Batateira na BHSJ foi a determinada por Fontenele (2010), utilizando geoestatística e do aquífero Exu, por Mendonça (2001), utilizando o MODFLOW.

No aquífero aluvionar, a condutividade hidráulica foi determinada *in loco*, através de um permeâmetro vertical de carga variável, adotando a metodologia proposta por (Song et. al., 2009). Esta metodologia utiliza um tubo de ferro fundido que foi cravado verticalmente no sedimento, com o mínimo de perturbação possível, a uma profundidade inicial de 0,40 m. Em seguida adiciona água, gerando uma carga inicial, cuja variação é registrada no tempo

(Figuras 13 e 14). Após a estabilização da carga hidráulica, prosseguiu-se a cravação do tubo até uma profundidade de 0,80 m e em seguida até 1,2 m, realizando o mesmo procedimento.

Figura 13 - Representação do procedimento para determinação da condutividade hidráulica vertical. L é a profundidade de cravação do tubo; h_1 e h_2 são as cargas hidráulicas adicionadas



Fonte: adaptado de Chen (2010).

Figura 14 - Medição da carga hidráulica no tubo cravado no sedimento da aluvião.



A condutividade hidráulica foi determinada em três pontos de diferentes seções transversais distribuídas no trecho perene do riacho, utilizando a Equação 5 de Hvorslev (1951).

$$Kv = \frac{\frac{\pi D}{11m} + Lv}{(t1 - t2)} \ln \left(\frac{h1}{h2} \right) \quad (5)$$

Onde:

Lv = comprimento do sedimento no tubo;

$h1$ e $h2$ = cargas hidráulicas no interior do tubo medidas nos tempos $t1$ e $t2$, respectivamente;

D = diâmetro interno do tubo;

m = parâmetro dado por $m = \sqrt{Kh/Kv}$;

Kh e Kv = condutividades hidráulicas horizontal e vertical dos sedimentos, respectivamente.

No cálculo considerou-se o meio isotrópico, com $m = 1$.

5.3.2 DRASTIC pesticida

O índice DRASTIC pesticida é uma adaptação para o setor agrícola, considerando algumas modificações nos índices de avaliações das propriedades topográficas, pedológicas e hidrogeológicas da área estudada. Segundo Aller et al. (1987) essas modificações estão relacionadas a capacidade de atenuação dos pesticidas pelo solo e zona vadosa, considerando o contaminante com a mesma mobilidade de um pesticida genérico.

No DRASTIC pesticida há uma elevação no índice de avaliação do tipo de solo, por possuir importância significativa na atenuação de poluentes, pois dependendo da espessura e do material que o compõe, os processos filtração, adsorção, biodegradação e volatilização podem ser bastante significativos em áreas de atividades agrícolas com aplicação de pesticidas (Aller et al. 1987).

A topografia tem influencia direta na infiltração de água no solo, áreas de menor declividade apresentam maior taxa de infiltração, devido a essa condição houve aumento no peso T considerando o uso de pesticidas.

Com o aumento da profundidade na zona vadosa, ocorre diminuição da quantidade de matéria orgânica e também menor biodegradação e volatilização. nesse contexto, essa zona tem uma menor capacidade de degradação dos pesticidas, tendo uma redução no peso I.

A condutividade hidráulica do aquífero também tem uma menor importância na capacidade de atenuação dos pesticidas, apresentando uma redução no peso C.

5.4 Planejamento do uso e ocupação do solo da BHSJ

O índice *DRASTIC* gera uma classificação da vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas em relação a um poluente não específico e o *DRASTIC* pesticida gera a classificação em relação a vulnerabilidade ao uso de pesticidas.

Segundo a Legislação Federal as Áreas de Proteção Permanente (APP) são aquelas áreas protegidas para preservação dos recursos naturais em zonas de maior fragilidade para o solo e a biodiversidade; por isso, as áreas nas margens dos cursos de água se caracterizam como sendo APPs, variando a largura destas de acordo com a largura dos rios.

Como as principais atividades antrópicas realizadas na bacia são a agricultura e a pecuária, utilizou-se o índice *DRASTIC* pesticida para o planejamento do uso e ocupação do solo, junto com a delimitação das áreas de APP de rio, gerando um mapa de planejamento do uso e ocupação do solo da BHSJ, utilizando o *software arcgis*.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

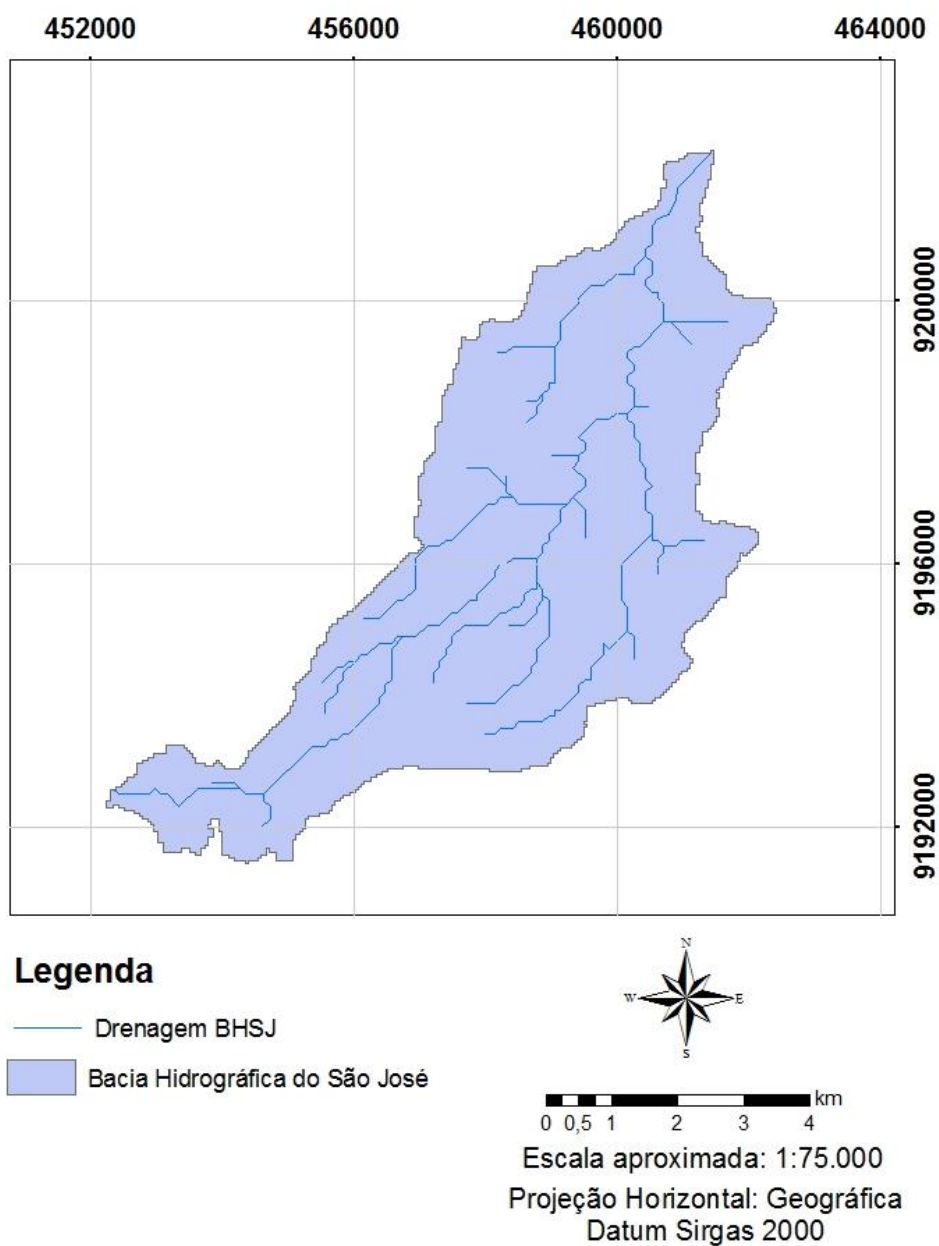
6.1 Mapeamento das áreas de aluvião

O mapeamento das áreas de aluvião foi dividido em 4 etapas: (i) extração da rede de drenagem da BHSJ; (ii) determinação dos *buffers* (larguras) ao longo da rede de drenagem; (iii) extração das áreas planas dentro dos *buffers* e; (iv) análise dos resultados do processo automático de mapeamento. Todas as operações utilizadas no mapeamento foram realizadas com o uso do *software Arcgis, Global Mapper e SPRING*.

6.1.1 Extração da rede de drenagem

A Figura 15 apresenta a rede de drenagem da BHSJ com os principais rios afluentes, definidos a partir dos dados do SRTM, tendo o início da formação da rede de drenagem na Zona de Chapada, onde se concentram as maiores altitudes e o exutório na Zona de Pediplano, onde se encontram as menores cotas topográficas.

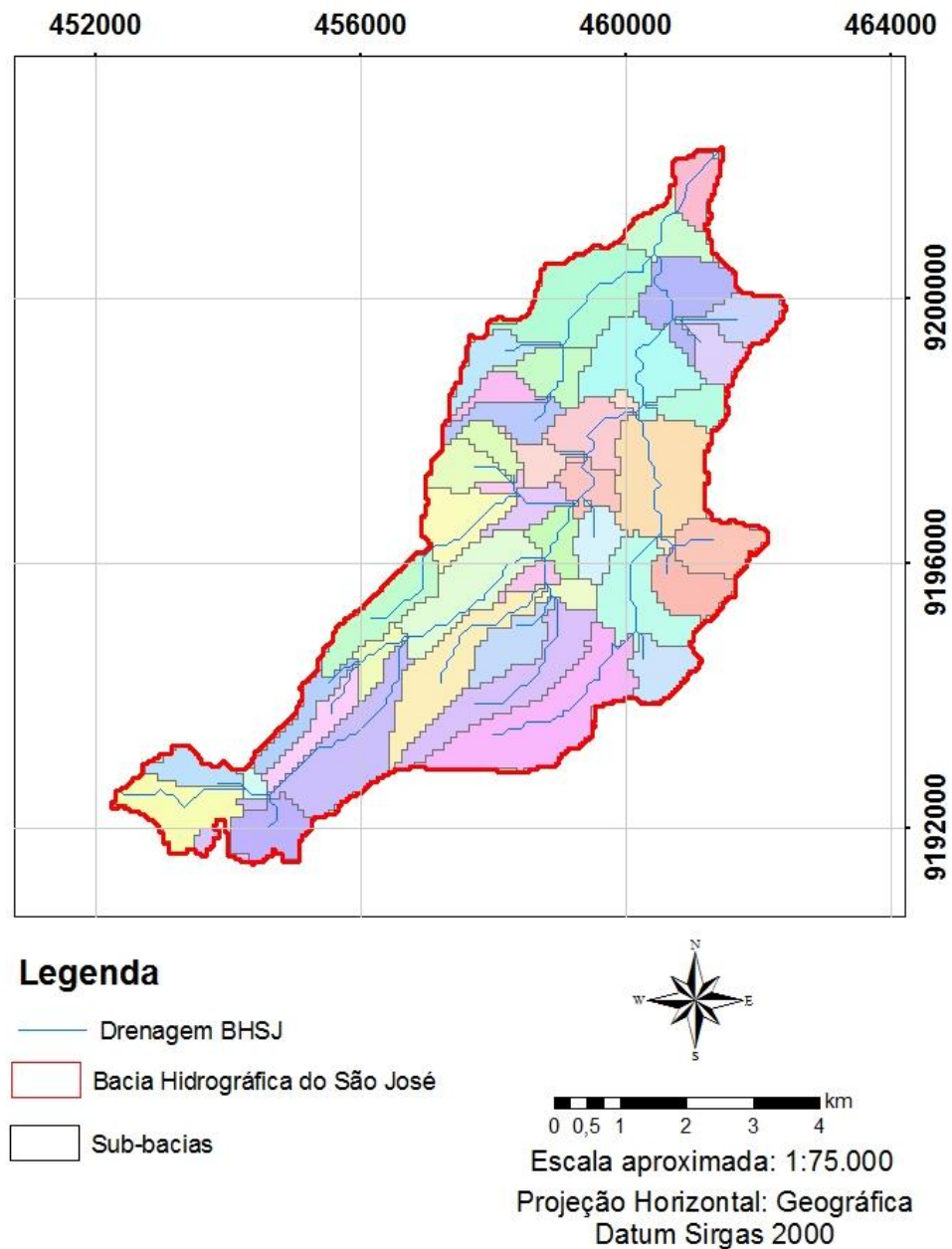
Figura 15 - Mapa com a rede de drenagem (azul escuro) e a delimitação da BHSJ (azul claro).



6.1.2 Determinação da largura do *buffer*

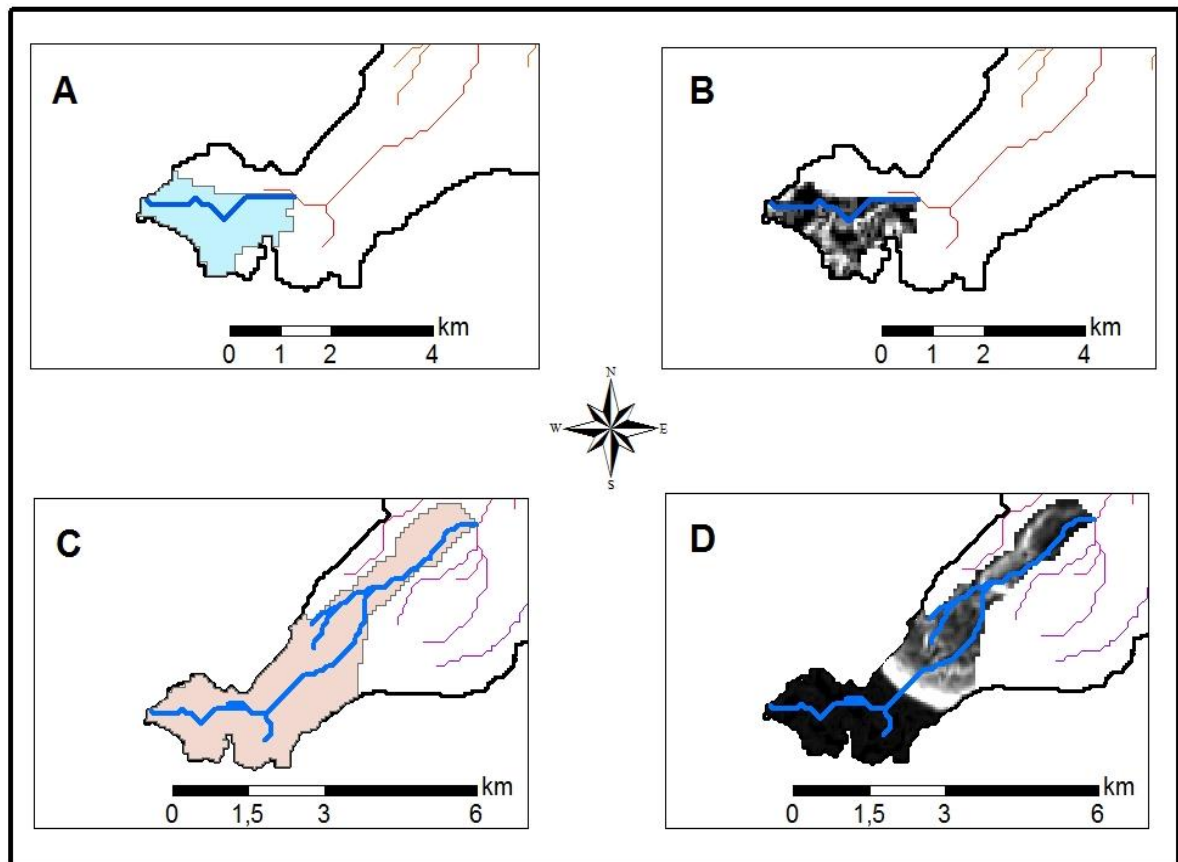
Para cada “r” (trecho de rio) da rede de drenagem determinou-se a área a montante que contribui com sedimentos e a sua declividade (Figura 17), que será utilizada no cálculo das larguras dos *buffers*. Para a determinação dessas áreas, a BHSJ foi subdividida em pequenas sub-bacias correspondentes a cada “r”, utilizando os dados do SRTM, através do *software Arcgis* (Figura 16).

Figura 16 - Mapa com a divisão da BHSJ em sub-bacias



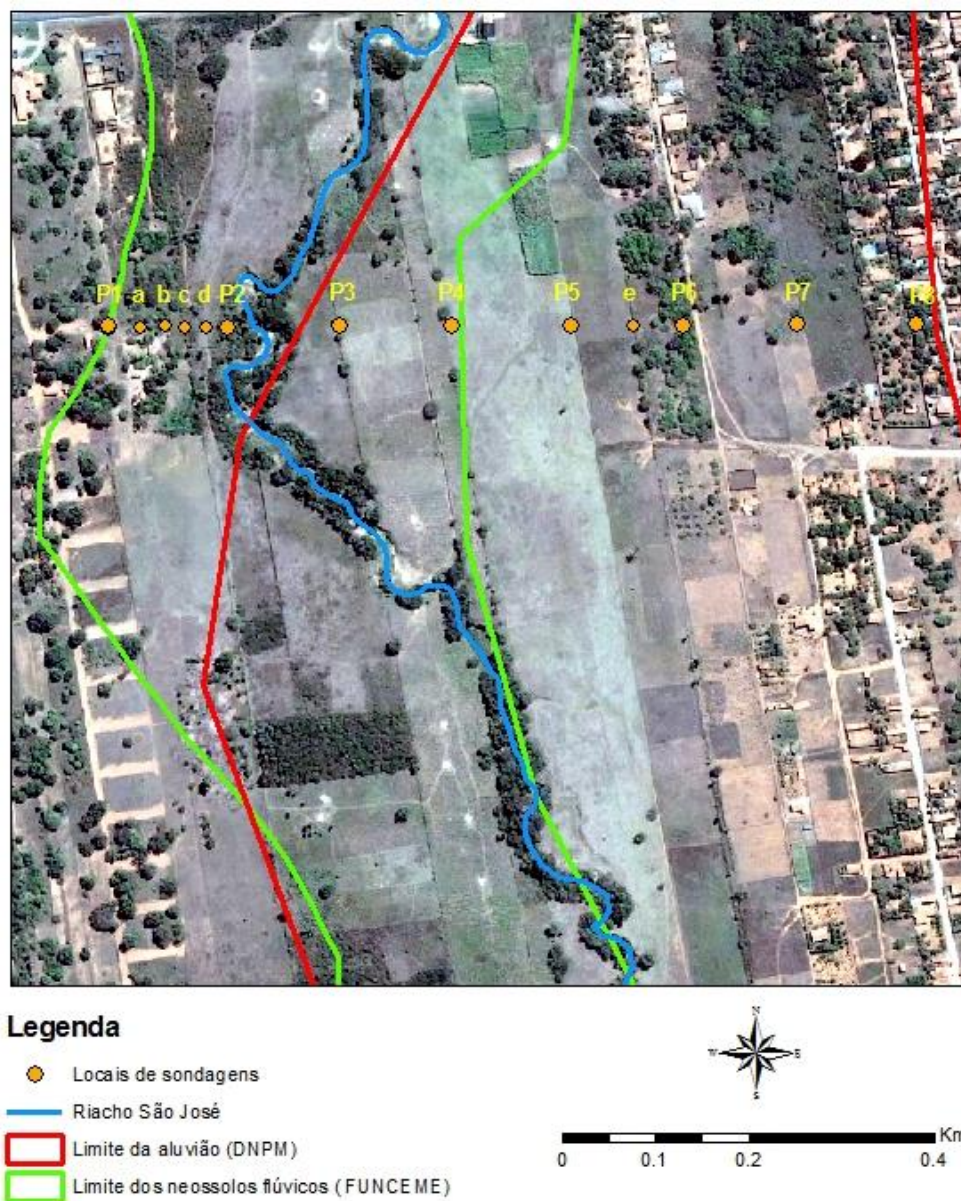
A Figura 17 apresenta a área da bacia para um dado trecho “r” da rede de drenagem, em Azul e a Figura 17 B, mostra o recorte do SRTM utilizado para o cálculo da declividade média da respectiva área as Figuras 17 C e D mostram o mesmo procedimento para outro trecho selecionado da rede de drenagem. Esse mesmo procedimento foi repetido para toda a rede de drenagem da bacia, encontrando assim, a área a montante representativa de cada trecho de rio e a sua declividade média.

Figura 17 - Área a montante de um trecho “r” (azul) (A e C) e recorte do SRTM utilizado para o cálculo da declividade da área (B e D)



Para a determinação do parâmetro largura "real" da aluvião, utilizado no mapeamento, realizou-se sondagens, cujos locais foram escolhidos a partir das delimitações das áreas de neossolos flúvicos feitas pela FUNCEME (2006) e da aluvião, pelo DNPM (1996) (Figura 18).

Figura 18 - Delimitação das áreas de aluvião e dos neossolos flúvicos e localização das sondagens utilizadas na definição da largura "real" da aluvião



As delimitações das áreas dos neossolos flúvicos feita pela FUNCEME (2006) (em verde) e das aluviões, pelo DNPM (1996) (em vermelho). Com base nessas delimitações iniciou-se as sondagens que foram alinhadas transversalmente ao leito do riacho São José (pontos laranja). Os pontos p1, p2, p3, p4, p5, p6, p7 e p8 foram espaçados 120 metros um do outro e os outros foram espaçados a distancias variadas, de acordo com as características granulométricas e de coloração encontradas em cada um deles a largura na área de aluvião nessa seção foi de 467 m. No ponto P1 aflora a formação Rio da Batateira, sendo o material coletado na sondagem, classificado como de classe textural arenosa e coloração avermelhada.

Toda sondagem onde o material não apresentasse essas características, era classificado como sendo área de aluvião.

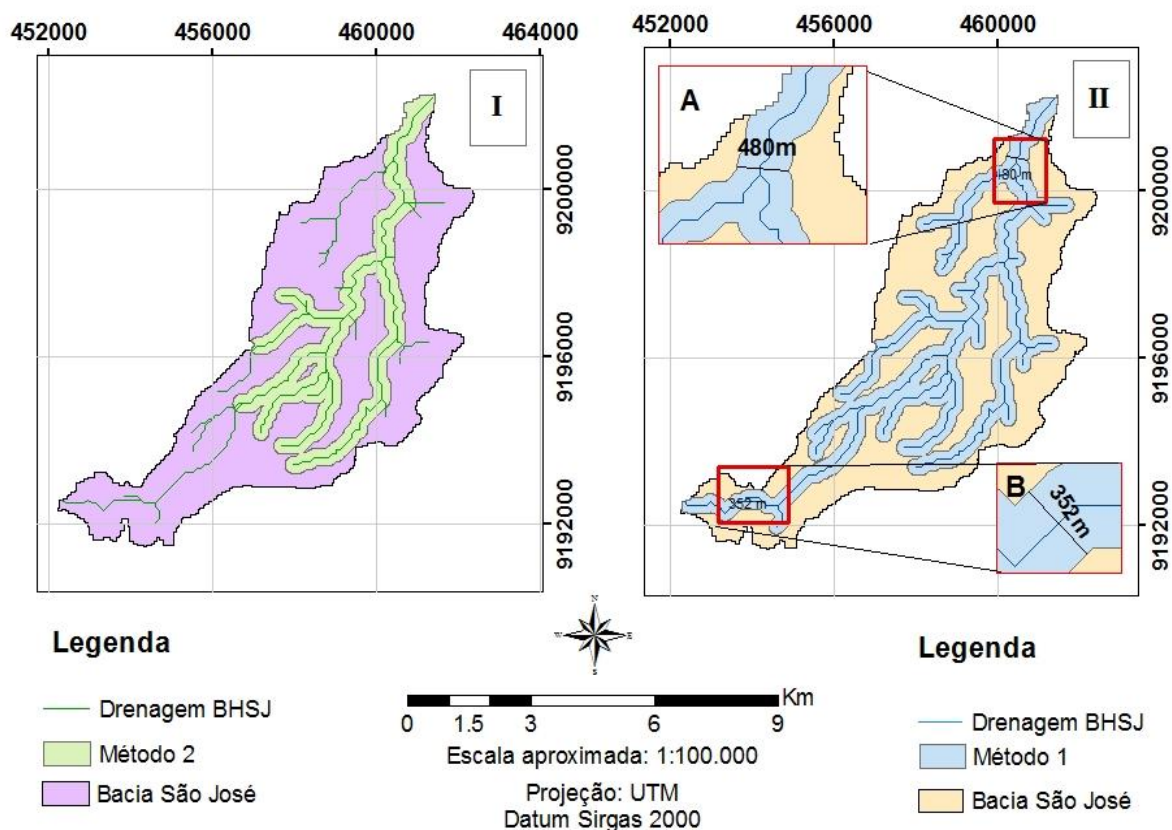
Para ter um melhor entendimento dos resultados apresentados pelos métodos de mapeamento utilizados, eles foram divididos em seis.

Os métodos 1 e 2 são aplicações da Equação 1 (cap. 5.1.2) respectivamente sem e com o uso das restrições de área e declividade da bacia a montante. Os métodos 3 e 4, são aplicação da Equação 2, também sem e com uso das mesmas restrições, respectivamente, o método 5 é a aplicação da Equação 6 e o método 6, a da Equação 7.

Analisando o mapeamento das áreas de aluvião, verificou-se que quando a bacia a montante de determinado trecho apresentasse área menor que 1.000.000 m² e declividade média inferior a 5 % não há a formação de aluvião. Com isso foram utilizadas essas duas restrições na formação de aluvião. A partir da largura da seção da aluvião encontrada de 467 m, obteve-se as respectivas constantes das Equações 1 e 2: a1 igual a 27,41 e a2 igual a 3,34. Burte (2008) utilizando a mesma metodologia obteve a1 igual a 45, para a bacia hidrográfica do Forquilha e a2 igual a 4, para a bacia Vista Alegre, ambas em área de cristalino.

Os *buffers* gerados a partir dos métodos 1 e 2, estão apresentados respectivamente na Figura 19 I e II.

Figura 19 - Mapa com os *Buffers* criados ao longo da rede de drenagem a partir do métodos 1 (II) e 2 (I).

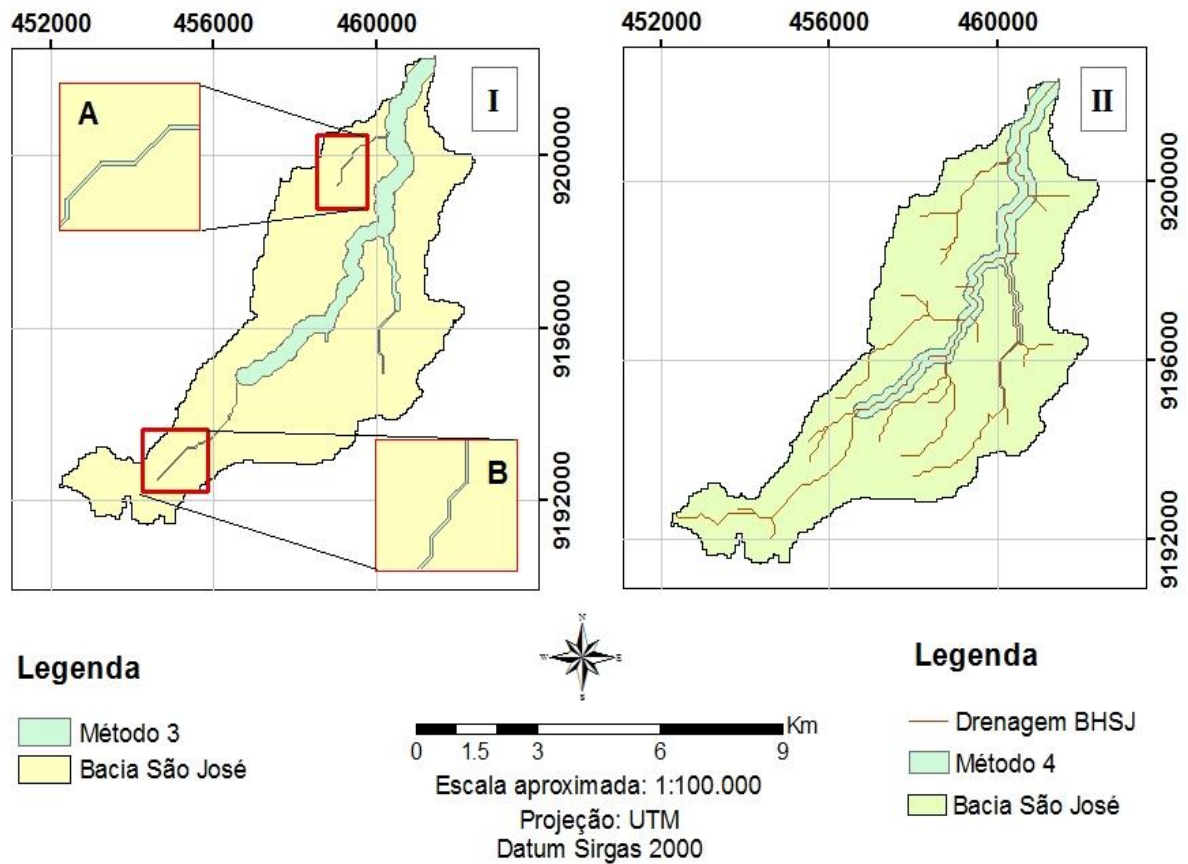


De acordo com a Figura 19 II, a largura do *buffer* gerado pelo método 1 próximo ao exutório da BHSJ (destaque A) é maior do que na Zona de Chapada (destaque B) o que acontece porque a bacia de contribuição de sedimentos próxima ao exutório é maior do que nas áreas mais a montante.

Na Figura 19 I estão os *buffers* gerados pelo método 2, com o uso da Equação 1, com as restrições. Algumas áreas mapeadas pelo método 1, não foram mapeadas por esse método, como por exemplo, as encontradas no topo da chapada. Essas áreas não foram mapeadas, devido as mesmas não apresentarem declividade mínima da área a montante necessária para formação de aluvião.

Na Figura 20 I estão representados os *buffers* gerados pelo método 3 (Equação 2, sem uso das restrições). O destaque B mostra trechos mapeados pelo método 3 na Zona de Pediplano, onde, possivelmente, não existem aluviões devido a declividade. A montante da área de destaque também não existe aluvião por encontrar-se na Zona de Talude da chapada. Já o destaque A representa uma outra área que é eliminada com a utilização das restrições. A Figura 20 II mostra os *buffers* gerados pelo método 4 que aplica a utilização das restrições.

Figura 20 - Mapas com os *buffers* criados ao longo da rede de drenagem a partir dos métodos 3 (I) e 4 (II)



Os dados utilizados na elaboração da Equação 6 aplicada no método 5, estão na Tabela 11, a Equação 6 foi obtida a partir do ajuste logarítmico entre as áreas S da bacia a montante e as respectivas larguras ℓ de uma seção da aluvião “real”.

Tabela 11 - Valores das áreas S da bacia a montante e das respectivas larguras ℓ de uma seção da aluvião

$S \text{ (m}^2\text{)}$	$\ell \text{ (m)}$
40271600	480
32126600	330
20181700	316
8942660	142

$$\ell = 196,7961 * \ln(S) - 3009,9854 \quad (6)$$

Onde:

ℓ = Largura de uma seção da aluvião (m);

S = Área da bacia a montante (m^2).

Os dados utilizados na elaboração da Equação 7 aplicada no método 6 estão na Tabela 12. A Equação 7, foi obtida a partir do ajuste logarítmico entre as áreas S da bacia a montante e as respectivas razões entre as larguras ℓ de uma seção da aluvião e as declividades médias da bacia a montante.

Tabela 12 - Valores dos logaritmos das áreas da bacia a montante e das respectivas razões entre as larguras ℓ de uma seção da aluvião e as declividades médias da bacia a montante

Ln (S)	ℓ/i
17,5112	58,6081
17,2852	39,2857
16,8203	35,1111
16,0063	19,5862

$$\ell = \frac{[\text{Ln}(S)+341,2253]*i}{22,4405} \dots\dots\dots(7)$$

Onde:

ℓ = Largura de uma seção da aluvião (m);

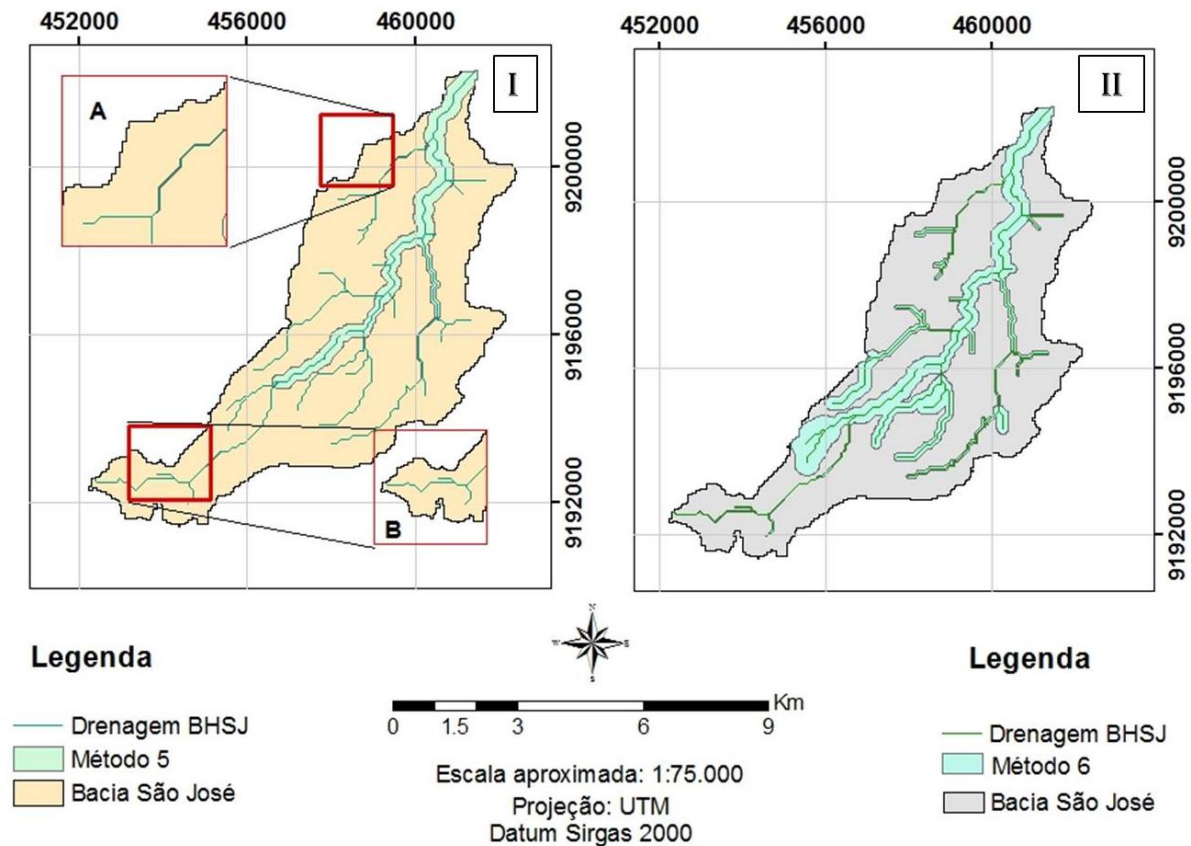
S = Área da bacia a montante (m^2);

i = Declividade média da bacia a montante (%).

Com a aplicação do método 5, trechos que em outros métodos eram classificados como aluvião, como é o caso dos encontrados nas Zonas de Chapada e de Talude, não são classificados por esse método, sem utilização das restrições (Figura 21 I, destaque A).

O método 6 de mapeamento é apresentado na Figura 21 II. Com a aplicação desse método, algumas áreas na Zona de Talude, são mapeadas como sendo áreas de aluvião, entretanto essas áreas não representam aluviões, devido as elevadas declividades. Semelhante ao método 5, as áreas da Zona de Chapada não são mapeadas como aluvião.

Figura 21 - Mapa com os *buffers* criados ao longo da rede de drenagem a partir dos métodos 5 (I) e 6 (II).



6.1.3 Extração das áreas planas dentro do *buffer*.

Seguindo a metodologia de mapeamento das áreas de aluviões, se faz necessário determinar as áreas consideradas planas dentro dos *buffers*.

Utilizando as cotas e as distâncias entre pontos na área onde foram realizadas as sondagens da aluvião, obteve-se a declividade de 3%.

No trabalho realizado por Ramalho Filho e Beek (1995), para desenvolvimento do sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras, as classes de declividades foram separadas em faixas, onde as áreas com até 3% foram consideradas planas. Já Burte (2008) encontrou para a bacia do Forquilha um valor limite de 4% para a declividade das áreas de aluvião. Esses valores estão compatíveis com o que foi definido para a BHSJ.

Nesse contexto na BHSJ serão consideradas como prováveis áreas de aluvião aquelas que apresentarem declividades inferiores a 3%. A Tabela 13 apresenta as classes de declividades definidas por Ramalho filho e Beek (1995).

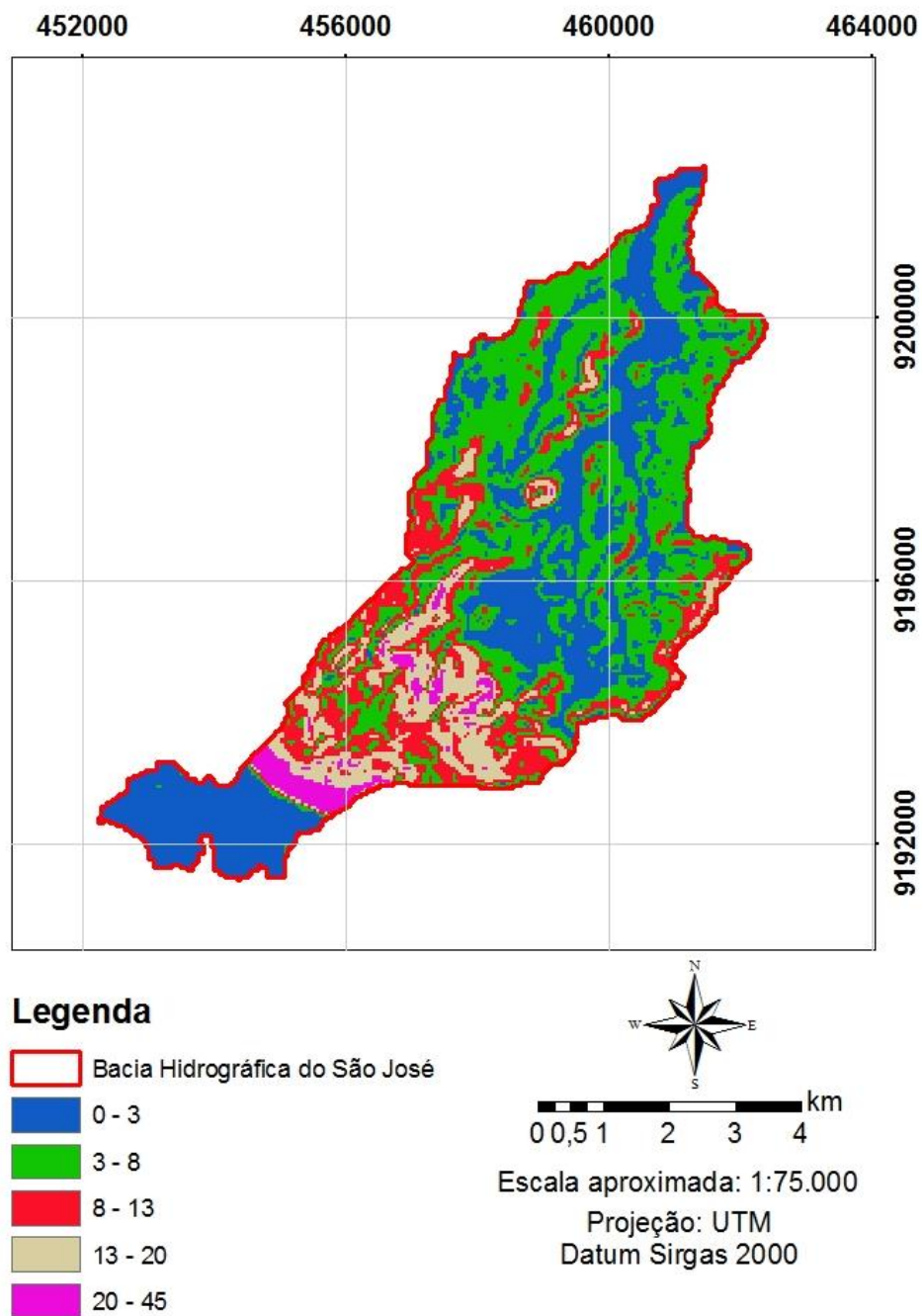
Tabela 13 - Classes de declividade

Declividade (%)	Discriminação
0 – 3	Relevo plano
3 – 8	Relevo suavemente ondulado
8 – 13	Relevo moderado ondulado
13 - 20	Relevo ondulado
20 - 45	Relevo forte ondulado
> 45	Relevo montanhoso

Fonte: Ramalho filho e Beek (1995).

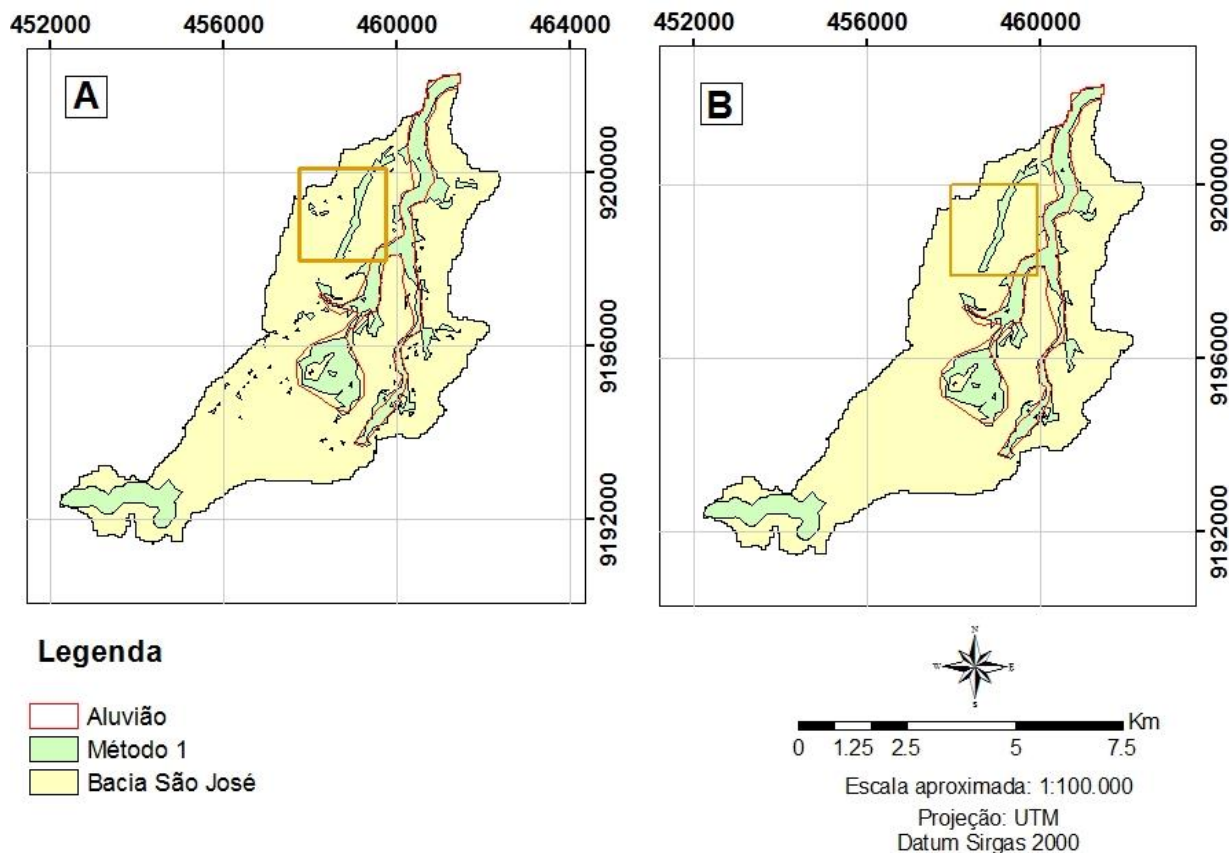
A Figura 22 mostra a divisão da BHSJ em classes de declividade de acordo com as definições de Ramalho Filho e Beek (1995). Em azul encontram-se as áreas consideradas como planas, cujas declividades são inferiores a 3%.

Figura 22 - Mapa com as classes de declividade da BHSJ segundo classificação de Ramalho Filho e Beek (1995)



A partir dos *buffers* gerados ao longo da rede de drenagem, utilizando o método 1, foram extraídas as áreas planas (com declividades inferiores a 3%) (Figura 23).

Figura 23 - Mapa com a extração das áreas planas dentro dos *buffers* gerados pelo método 1, com as áreas órfãs (A) e sem as áreas órfãs (B) e a delimitação "real" da aluvião (vermelho)



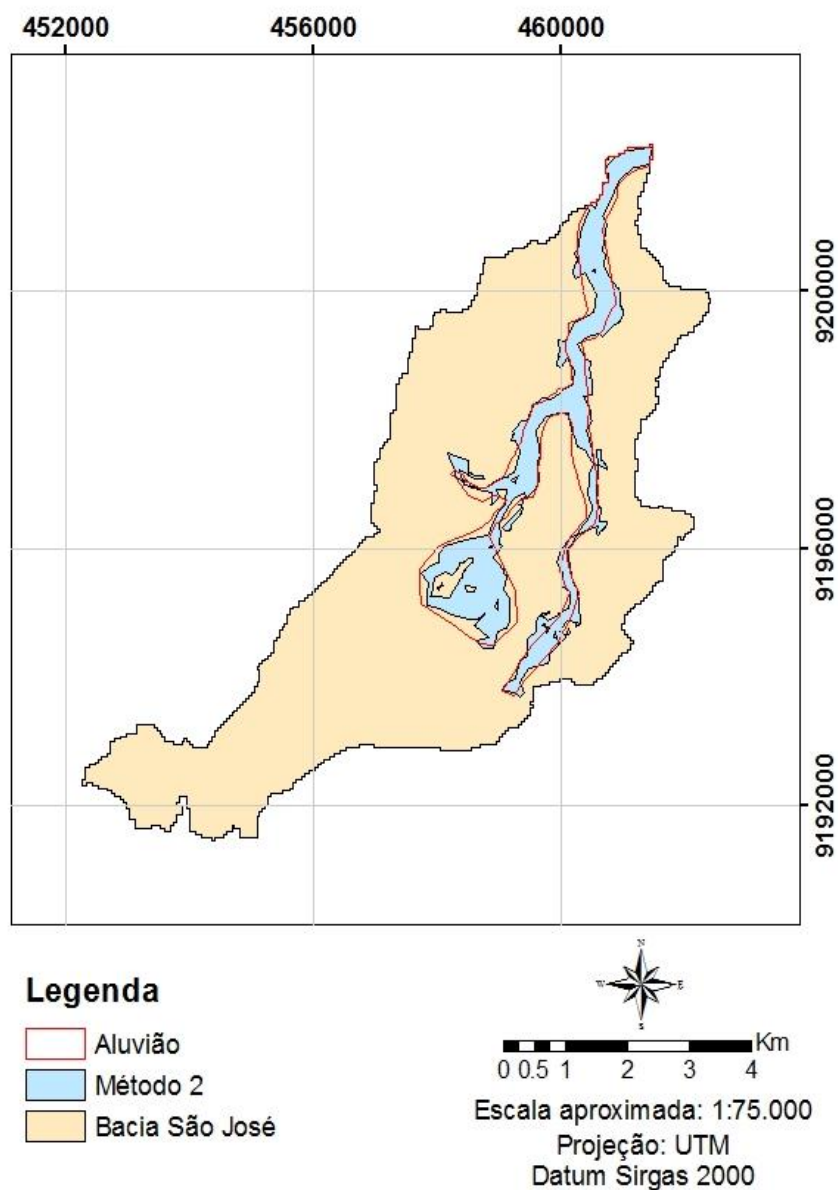
Sem a utilização das restrições para o mapeamento das aluviões, algumas áreas são equivocadamente mapeadas. A área que se encontra na Zona de Chapada da BHJS, por terem declividades baixas ($< 3\%$) e estarem associadas a uma rede de drenagem (Figura 23) é uma dessas áreas, além da área em destaque no quadro laranja. Essas áreas são classificadas como sendo de aluvião devido estarem associadas a uma rede de drenagem e apresentarem áreas planas (Figura 23).

Outro ponto importante a ser observado na Figura 23 é o surgimento de pequenas áreas caracterizadas como órfãs, por não serem caracterizadas como aluvião. Segundo Burte (2008) essas áreas devem ser excluídas do mapa. As Figuras 23 A e B apresentam respectivamente o mapeamento sem e com a exclusão dessas áreas.

Nos demais métodos de mapeamento utilizados, as áreas órfãs também foram excluídas.

A Figura 24 mostra o mapa com a extração das áreas planas dentro dos *buffers* gerados pelo método 2.

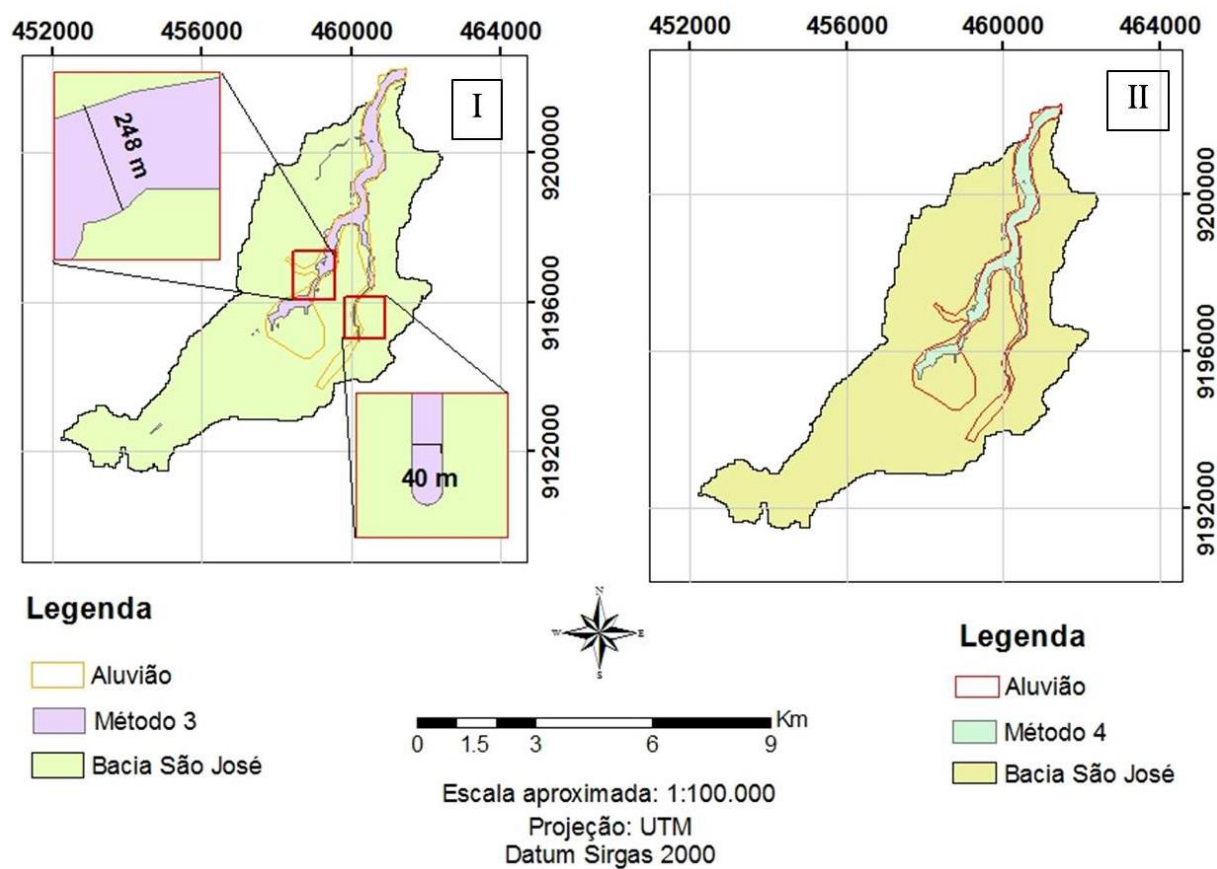
Figura 24 - Mapa com a extração das áreas planas dentro dos *buffers* gerados pelo método 2 (azul) e delimitação "real" da aluvião (vermelho)



Com a utilização das restrições do método 2, é possível eliminar as áreas equivocadamente mapeadas pelo método 1. Assim, a aluvião definida por esse método ficou quase que totalmente dentro do contorno "real" da aluvião (contorno vermelho) (Figura 24).

As Figuras 25 I e II mostram os mapas com as extrações das áreas planas dentro dos *buffers* gerados, respectivamente pelos métodos 3 e 4.

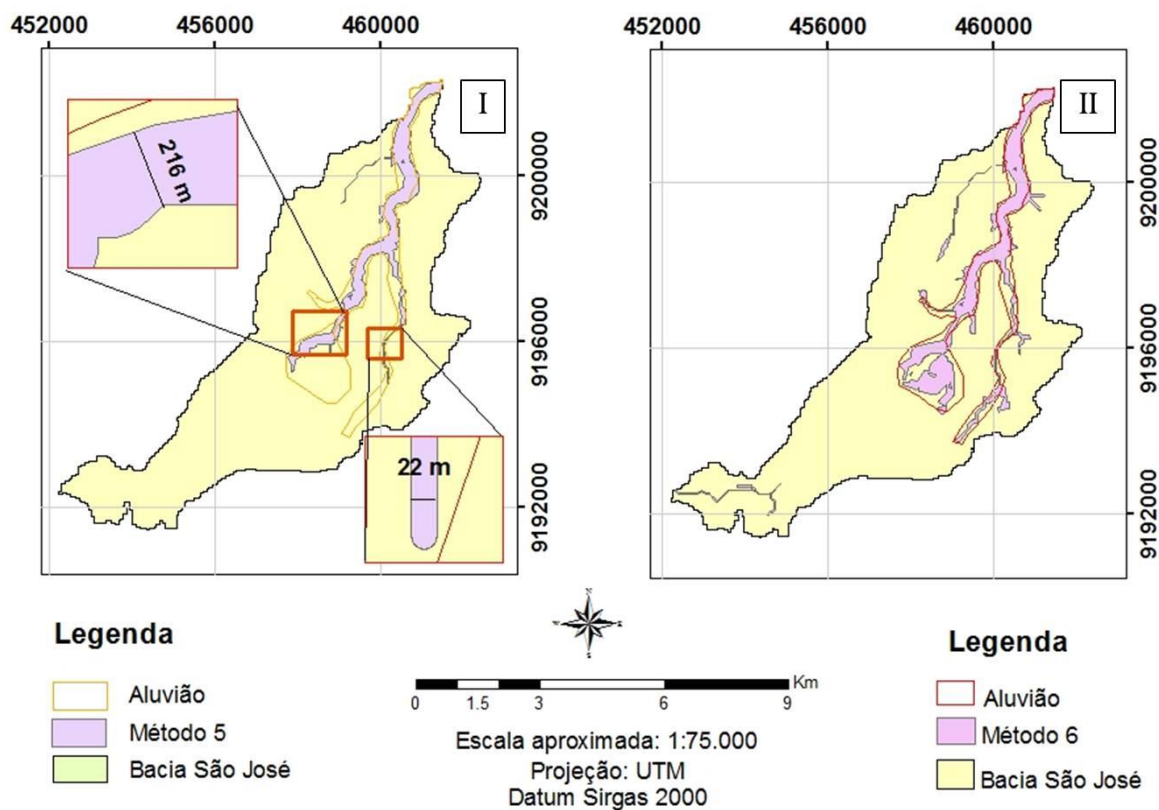
Figura 25 - Mapa com a extração das áreas planas dentro dos *buffers* gerados pelos métodos 3 (I, roxo) e 4 (II, verde) e a delimitação "real" da aluvião (vermelho). Nos destaques A e B estão as larguras encontradas em dois *buffers*.



Como também foi observado nas metodologias anteriores, quando não se aplica as restrições, algumas áreas são definidas como aluvião de forma errada, como pode ser observado na Figura 25 I.

As Figuras 26 I e II mostram os mapas gerados respectivamente pelos métodos 5 e 6.

Figura 26 - Mapa com a extração das áreas planas nos *buffers* gerados pelos métodos 5 (I) e 6 (II) e a delimitação "real" da aluvião (vermelho)



De acordo com a Figura 26 I, o mapeamento realizado pelo método 5 apresenta-se resultado semelhante ao realizado pelo método 3 (Figura 25 I), no entanto diferenças são observadas nas larguras dos *buffers*, como mostram os destaques A e B das Figuras 25 I e 26 I.

6.1.4 Avaliação do mapeamento

Um dos critérios utilizados na avaliação do mapeamento automático foi a comparação de áreas. Nesse critério as áreas das aluviões obtidas pelos seis métodos, juntamente com as definidas pela FUNCEME (2006) e pelo DNPM (1996), foram comparadas com a área da aluvião "real" (Tabela 14). Outro critério utilizado foi a observação dos contornos das aluviões delimitados por cada método.

Observando as áreas e as delimitações apresentadas por cada um dos métodos, é possível concluir que o método 2 apresenta o melhor resultado para ambas as análises. A área

da aluvião definida por esse método corresponde a 12 % da área total da BHSJ, enquanto que a delimitação "real" corresponde a 14 %. Além do mais, os contornos da aluvião delimitados pelo método 2 ficou quase em concordância com a delimitação "real", como observado na Figura 24.

Tabela 14 - Áreas encontradas por cada metodologia de mapeamento

Metodologia adotada	Área (m²)	% da área da BHSJ
Método (1)	4868852	18
Método (2)	7210540	12
Método (3)	2780927	7
Método (4)	2658030	6
Método (5)	2677167	7
Método (6)	4115471	10
Aluvião FUNCEME	9002938	22
Aluvião DNPM	7842428	19
Aluvião "real"	5663450	14

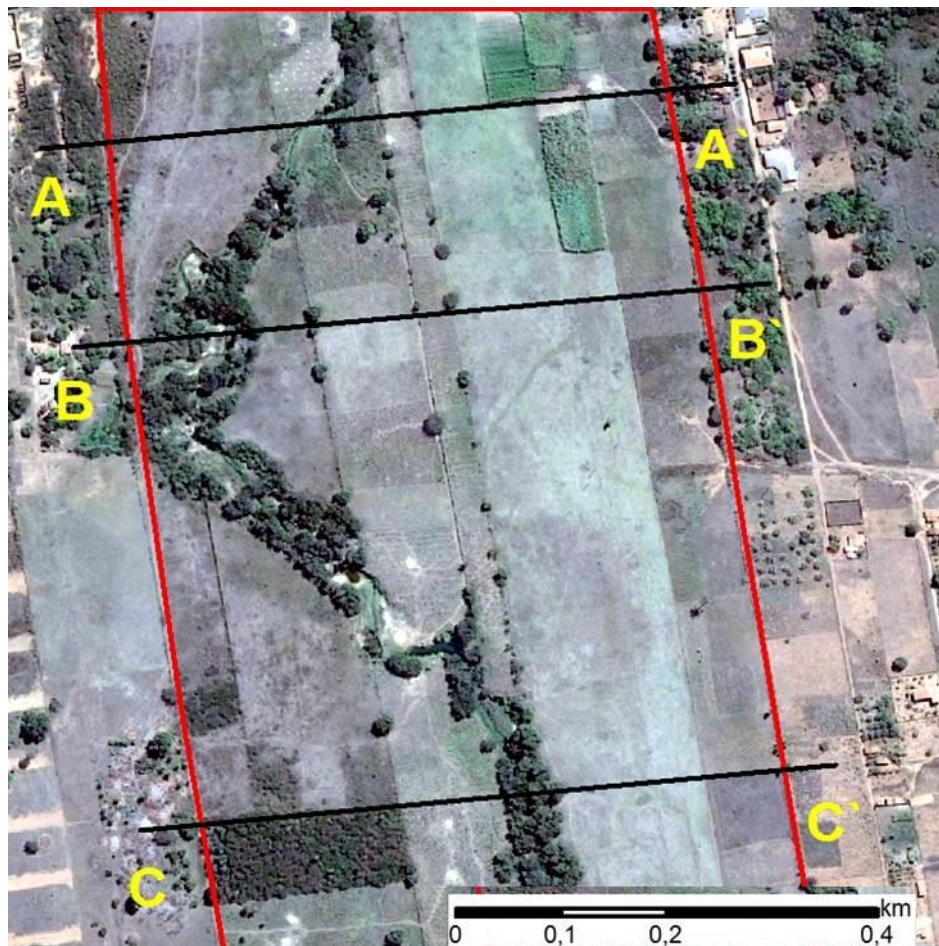
Assim a área e os contornos da aluvião delimitados pelo método 2 apresentaram melhores resultados do que os delimitados pela FUNCEME (2006) e pelo DNPM (1996). Com isso, dependendo da importância do trabalho que venha a ser realizado, pode-se sugerir o uso dessa metodologia, levando em consideração que as informações necessárias para o desenvolvimento do trabalho são de fácil obtenção.

6.2 Potencial hídrico da aluvião

Com a realização do mapeamento superficial das áreas da aluvião e através de sondagens para a caracterização da profundidade, foi possível determinar o potencial hídrico.

A área utilizada na determinação do potencial hídrico da aluvião esta representada na Figura 27. Nela encontra-se três seções transversais ao riacho, utilizadas na caracterização espacial do pacote aluvionar. A seção A-A' encontra-se a 168 m de distância da seção B-B', que se encontra a 485 m da seção C-C'. A largura de cada seção é de 409 m.

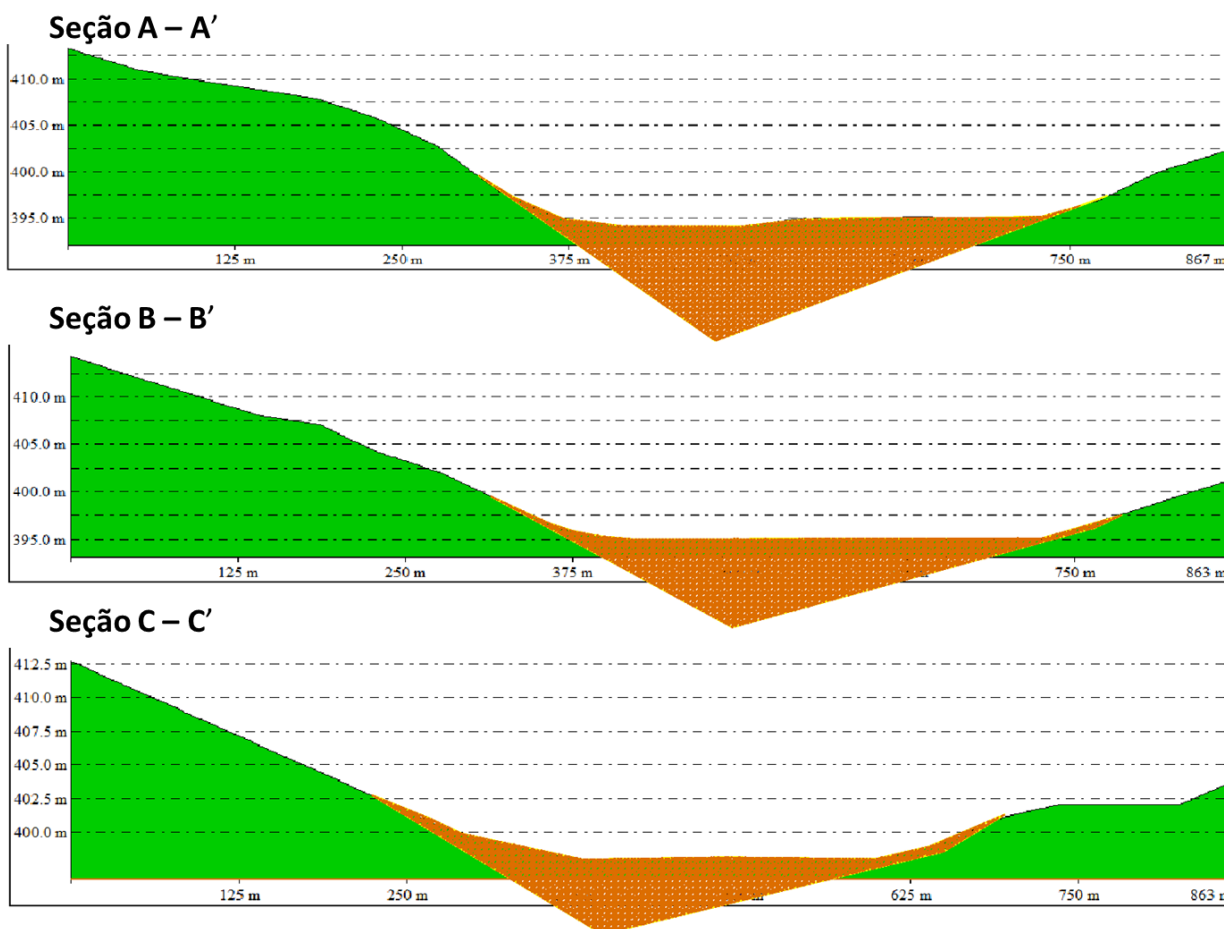
Figura 27 - Delimitação da área utilizada na determinação do potencial hídrico da aluvião. A-A', B-B' e C-C' são seções transversais



Na seção B-B' da Figura 27, foram realizadas sondagens, para determinação dos limites da aluvião e para construção dos perfis das Figuras 28 e 29.

Na Figura 28 estão os perfis das três seções transversais utilizadas para o cálculo do volume de sedimentos da aluvião. Na seção A-A' encontra-se a área transversal da aluvião (em marrom), obtida a partir do prolongamento das retas tangentes às superfícies laterais de exposição dos solos provenientes da Formação Rio da Batateira.

Figura 28 - Perfis das seções transversais A-A', B-B' e C-C' utilizadas no cálculo do volume de sedimentos da aluvião. Na seção A-A', em amarelo, encontra-se a área transversal da aluvião



Burte (2008) utilizou essa mesma metodologia na definição de áreas transversais de um trecho aluvionar da bacia do Forquilha e V. Alegre, utilizadas na caracterização espacial da aluvião e posterior determinação do potencial hídrico. Nesse trabalho ele enunciou duas limitações desse método: (i) a seção transversal de um aquífero aluvionar pode ser melhor definida por um trapézio ou até mesmo por um retângulo; (ii) o pacote aluvionar geralmente não se encontra totalmente saturado, pois o nível piezométrico no mesmo depende da carga hidráulica no riacho. Entretanto esse método foi utilizado no presente trabalho para estimar a ordem de grandeza da capacidade de armazenamento da aluvião do riacho São José.

O perfil estratigráfico que apresenta a textura dos sedimentos da aluvião, utilizado na determinação da porosidade efetiva média, está na Figura 29. Na construção desse perfil foram utilizadas 103 análises granulométricas.

Observa-se na Figura 29 predominância de sedimentos de textura arenosa nas proximidades do rio São José, com poucas camadas de textura argilosa e média.

Os sedimentos aflorantes da Formação Rio da Batateira, obtidos por tradagem, foram classificados como de textura arenosa (cor vermelha na Figura 29).

A textura predominante na aluvião é a média, presente em aproximadamente 69 % da área do perfil aluvionar. A textura arenosa foi encontrada em 22 %, a argilosa e a muito argilosa juntas ocupam 9 % da área do perfil. Com as áreas de cada classe textural e as macroporosidades determinadas a partir dos sedimentos coletados no perfil exposto próximo ao riacho (Figura 10 do item 5.2), estimou-se uma porosidade efetiva média de 8,3%. Esse é o resultado da média ponderada das macroporosidades, tomando como peso os percentuais das áreas de cada classe textural presentes no perfil (Tabela 15).

Tabela 15 - Classe textural, macroporosidade e percentual da área do perfil

Camadas	Macroporosidade	Classe textural	% da área
1 °	9,16	arenoso	22
2 °	8,15	médio	69
3 °	6,02	muito argiloso	4
4 °	7,80	argiloso	5

Essa porosidade efetiva média está próxima à encontrada por Burte (2008) para a aluvião da bacia do Forquilha e V. Alegre, que foi de 10%. Esse valor corresponde a média aritmética das porosidades efetivas obtidas a partir de testes de bombeamento realizados em três poços e da análise indireta, a partir de uma curva de referência, tomando como base análises granulométricas obtidas por sondagem.

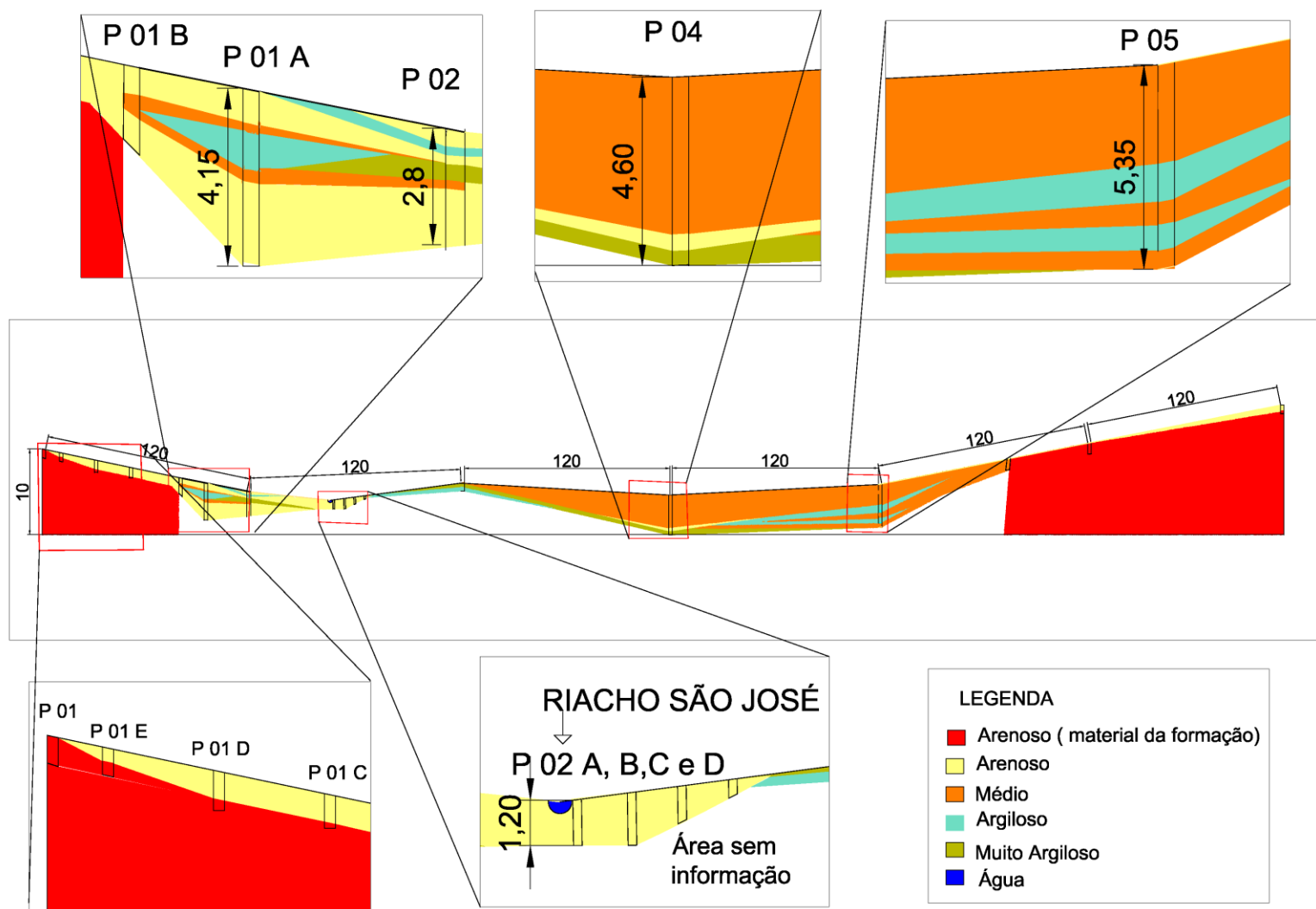


Figura 29 - Perfil estratigráfico da seção B-B' apresentando a textura dos sedimentos da aluvião

Considerando as três áreas transversais da aluvião semelhantes (Figura 28 em marrom), com média 5.930 m^2 e adotando a distância de 1.012 m entre as seções A-A' e C-C', obtém-se um volume de sedimento aluvionar de aproximadamente $6.000.000 \text{ m}^3$. Assim, para a porosidade efetiva média de $8,3\%$, tem-se a capacidade de armazenamento da orem de 498.000 m^3 .

A determinação da capacidade de armazenamento da aluvião é uma informação importante para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos, mostrando também a importância da preservação desse recurso natural quanto a contaminação.

6.3 Vulnerabilidade a poluição

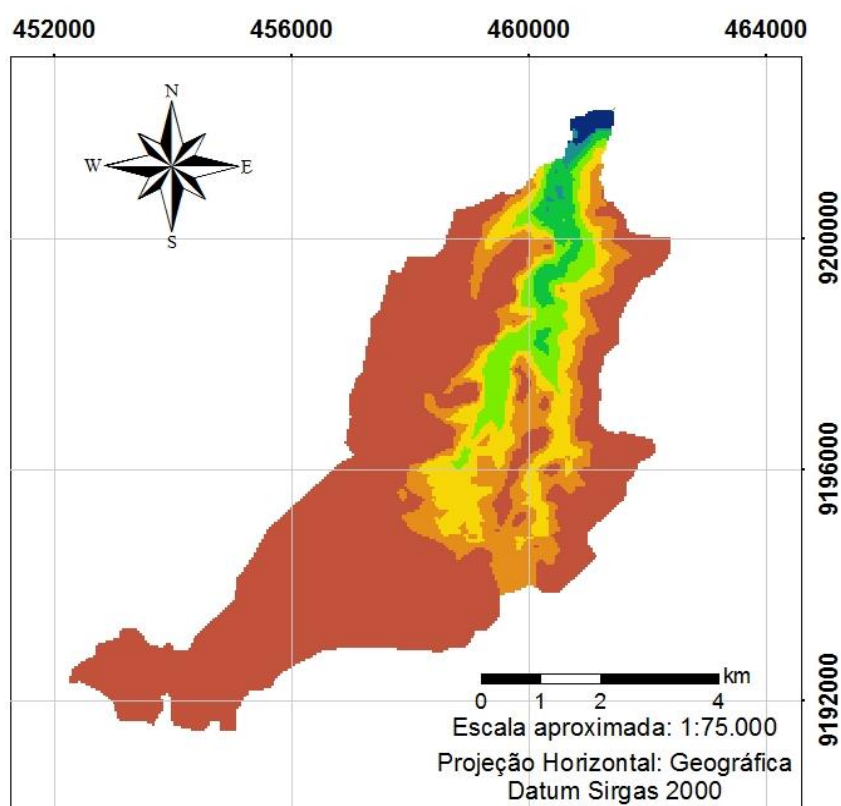
A susceptibilidade a poluição do Sistema Aquífero Superior, localizado na Zona de Chapada, bem como, do Sistema Aquífero Médio e aquífero aluvionar que se encontram na Zona de Pediplano da BHSJ. Nessa avaliação utilizou-se os índices *DRASTIC* e *DRASTIC* pesticida.

No presente estudo utilizou-se várias técnicas de mapeamento automático da aluvião a partir das quais optou-se pelo método 2 por apresentar resultados mais próximos da delimitação "real", porém, na aplicação dos índices *DRASTIC*, utilizou-se a delimitação "real" obtida a partir de sondagens em campo e imagens de satélites.

6.3.1 Profundidade do nível estático (D)

As profundidades do nível estático na BHSJ foram agrupadas, de acordo com as classes utilizadas pelo índice *DRASTIC* e a elas foram atribuídos os respectivos valores de avaliação (Figura 30).

Figura 30 - Espacialização da profundidade do nível estático do aquífero na BHSJ e os respectivos índices *DRASTIC*



Legenda

Profundidade (m)	Índice DRASTIC
<1.5	10
1.5 - 4.6	9
4.6 - 9.1	7
9.1 - 15.2	5
15.2 - 22.9	3
22.9 - 30.5	2
>30.5	1

A profundidade do nível estático da BHSJ variou de valores menores que 1,5 m na região próxima do exutório (área em azul escuro na Figura 30) a valores superiores a 30 m (área em marrom).

A Tabela 16 representa as áreas ocupadas por cada intervalo de profundidade na BHSJ.

Tabela 16 - Intervalos de profundidade e respectivas áreas na BHSJ

Profundidade (m)	% da área da BHSJ
< 1,5	0,75
1,5 – 4,6	0,29
4,6 – 9,1	2,89
9,1 – 15,2	5,55
15,2 – 22,9	10,93
22,9 – 30,5	13,82
>30,5	65,75

Observa-se na Tabela 16 que a classe com valores de profundidade superiores a 30,5 m encontram-se em mais de 65% da área da bacia e as profundidades inferiores a 4,6 m encontram-se em apenas 1,04%.

Segundo Tavares et al. (2009), na região do Cariri cearense, onde está inserida a BHSJ, os níveis estáticos entre 20 e 50 m encontram-se em aproximadamente 60% da área, enquanto as profundidades entre 20 e 5 m encontram-se em 37%. Entretanto, Viana (2007) observou na mesma área que os níveis estáticos encontram-se entre 0 e 95 m. Nesse contexto, 34% da área apresentou níveis estáticos menores ou igual a 10 m, 25% entre 10 e 20 m, 18% entre 20 e 40 m e 23% superior a 40 m.

6.3.2 Recarga do aquífero (R)

De acordo com a Equação 4 ajustada por Fontenele (2010) (Item 5.3.1 de Materiais e Métodos) para a BHSJ foram encontrados valores de recarga do aquífero através dos dados de precipitação dos últimos 39 anos na área.

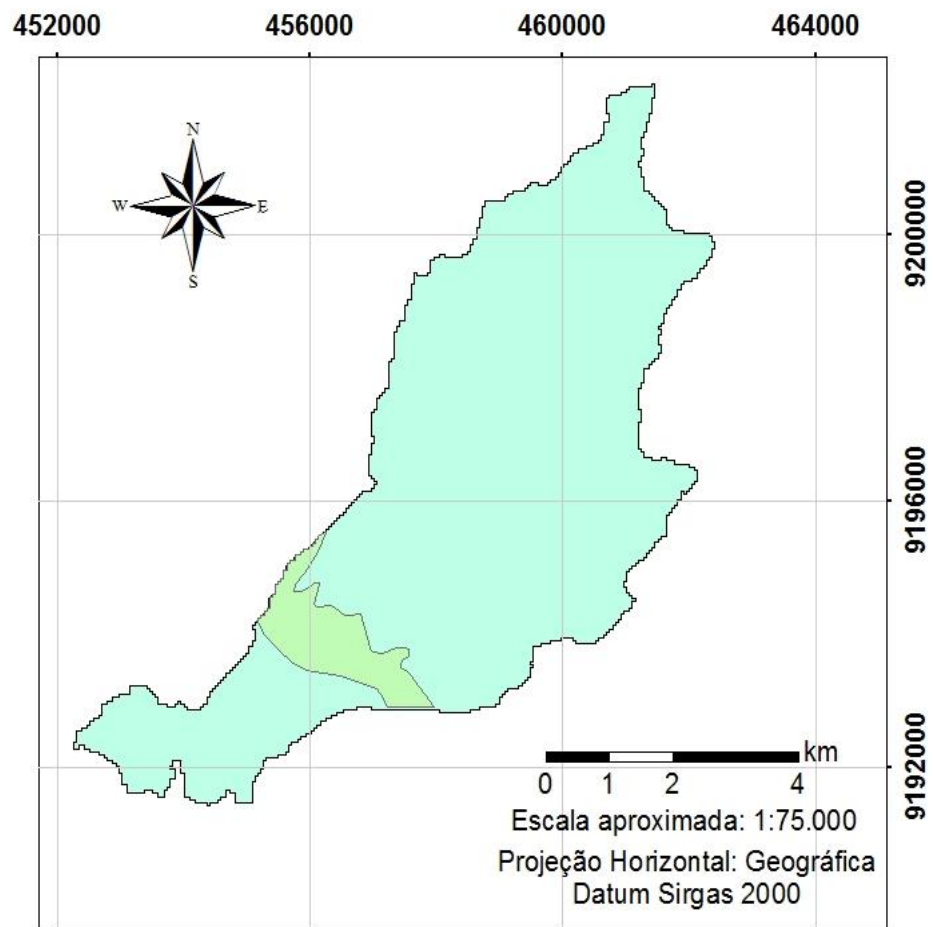
Na Tabela 17 estão apresentados os intervalos de classes de recarga utilizados no *DRASTIC*, com as respectivas frequências de ocorrência. No presente estudo observou-se que recargas entre 51 a 102 mm ano⁻¹ ocorreram em aproximadamente dezessete anos, sendo, portanto o intervalo de classe de maior frequência, considerando o valor médio desse intervalo de classe de 76,5 mm ano⁻¹ tem-se o índice *DRASTIC* R igual a 3.

Tabela 17 - Intervalos de classes de recarga anual (R) e frequências de ocorrência (n)

R (mm/ano)	n
< 51	16
51-102	17
102-178	5
178-254	1
>254	0

A espacialização do índice *DRATIC* R está mostrada na Figura 31, na Zona de Talude, onde se encontra a Formação Santana, não há recarga por se tratar de um aquíclode, sendo, portanto, atribuída para esta área um índice unitário. Esse valor foi extrapolado para a Zona de Chapada pela falta de informações.

Figura 31 - Espacialização recarga na BHSJ e os respectivos índices *DRASTIC*



Legenda

Recarga (mm/ano) Índice *DRASTIC*

 0	1
 76,5	3

A recarga da BHSJ foi determinada a partir de resultados de Fontenele (2010) ao simular a dinâmica de fluxo na área com uso do *MODFLOW*. Esse aplicativo utiliza o método das diferenças finitas para resolver a equação diferencial parcial que rege o fluxo hídrico subterrâneo. Essa equação diferencial parcial para aquíferos livres (Equação 3, item 5.3.1 de Materiais e Métodos) tem a porosidade efetiva da aluvião em um dos termos. Assim, a variação de carga hidráulica no tempo, produzida pela recarga na área, dependerá dessa porosidade efetiva, que foi ajustada na simulação.

De forma simplificada, um dos métodos utilizado na estimativa da recarga foi a determinação pontual da lâmina percolada efetiva, a partir da multiplicação da variação de carga observada em poços durante um ano hidrológico pela porosidade efetiva do aquífero. Esse método foi utilizada por Barreto (2006), Cutrim (2010) e Ausani (2010). Barreto (2006) encontrou uma recarga média de $116,2 \text{ mm ano}^{-1}$ para o aquífero livre Serra Grande localizado na cidade de Tianguá-CE, Ausani (2010) encontrou recargas variando de 51,85 a $103,70 \text{ mm ano}^{-1}$, na sua área de estudo localizada no município de São Francisco de Assis, na região central do estado do Rio Grande do Sul, no ano hidrológico de 1995. Já Cutrim (2010) encontrou recargas entre 25 e 205 mm ano^{-1} , durante o ano hidrológico de 2007, para os aquíferos livres e menores ou iguais a 25 mm ano^{-1} para aquíferos confinados, na área do aquífero Furnas, localizado no município de Rondonópolis, estado de Mato Grosso.

O uso da metodologia adotada nesse trabalho é mais confiável que a metodologia simplificada, pois a recarga foi obtida através da solução da equação diferencial parcial, ajustando as cargas hidráulicas observadas e calculadas de poços monitorados na área.

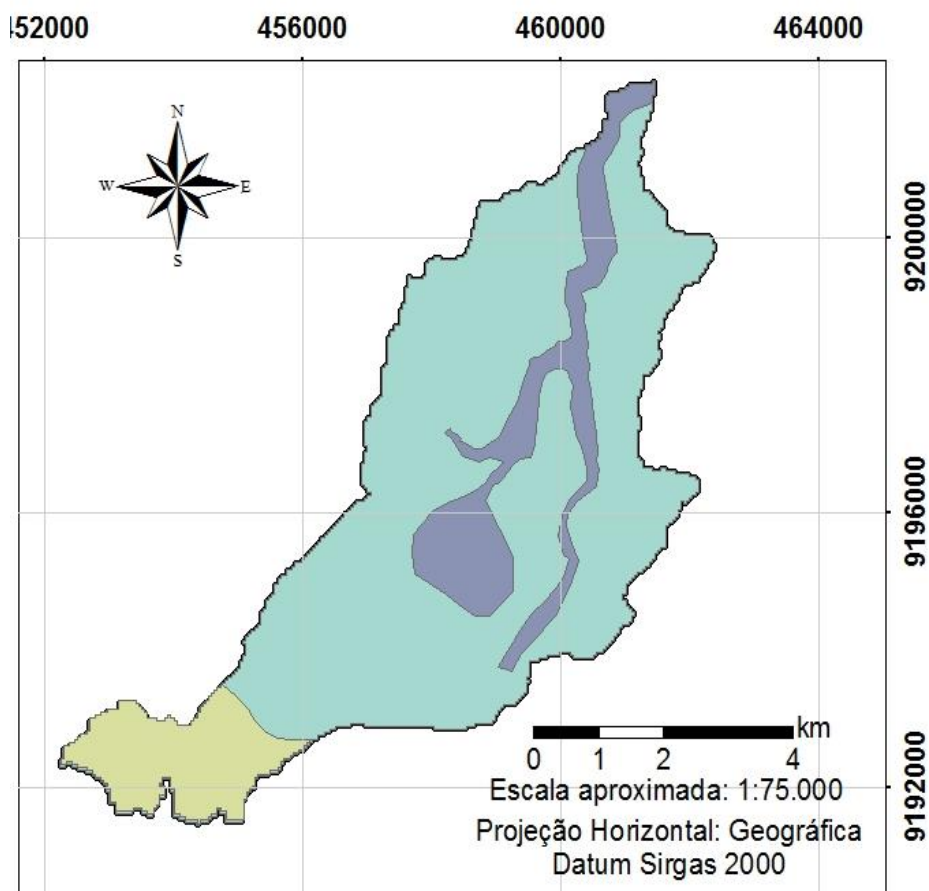
6.3.3 Material do aquífero (A)

Na área de entorno e sotoposto à aluvião, encontra-se o aquífero Rio da Batateira. Esse aquífero é constituído de arenitos fluviais médios a grosseiros, variando em profundidade para arenitos médios a finos e siltitos argilosos (CEARÁ, 2005). Já na Zona de Talude aflora o aquífero Santana, caracterizado por gipsita, calcita e folhelhos argilosos e na Zona de Chapada, predomina o aquífero Exu, caracterizado por arenitos

A aluvião da BHSJ é constituída de material arenoso e areno-argiloso, distribuído em toda a área de forma heterogênea. Esse resultado está de acordo com Viana (2007), que também encontrou material areno-argiloso em aquíferos aluviais da região do Cariri.

A Figura 32 apresenta o mapa com a espacialização do índice *DRASTIC* na BHSJ.

Figura 32 - Espacialização dos aquíferos na BHSJ e os respectivos índices *DRASTIC*



Legenda

Material do Aquífero Índice DRASTIC

Formação

	Aluvião	8
	Exu	6
	Rio da Batateira	6

Para a área de aluvião, constituída de materiais areno-argilosos, atribuiu-se índice 8; para os aquíferos Exu e Rio da Batateira, constituídos de arenitos, atribuiu-se 6 (de acordo com a tabela 6, pag. 54). Valores iguais foram encontrados por Barreto (2006) para os aquíferos areníticos e aluvionares.

6.3.4 Tipo de solo (S)

De acordo com FUNCEME (2006) são encontrados cinco tipos de solo na BHSJ: Neossolos Litólicos, Argissolos Vermelho Amarelo, Neossolos Flúvicos, Latossolos Vermelho Amarelo e Latossolos Amarelos. Os tipos de solos com as respectivas texturas e índices *DRASTIC* estão na Tabela 18.

Tabela 18 - Tipos de solos com as respectivas texturas e índices *DRASTIC* S

Tipo de solo	Textura	S
NEOSSOLO LITÓLICO	Franco arenoso	6
ARGISSOLO VERMELHO AMARELO	Areia franca	7
NEOSSOLO FLÚVICO	Areia	9
LATOSSOLO VERMELHO AMARELO	Franco arenoso	6
LATOSSOLO AMARELO	Franco siltoso	4

De acordo com as análises granulométricas, os Neossolos Litólicos apresentam textura Franco Arenosa, sendo a eles atribuído um índice *DRASTIC* (S) igual a 6. Para o mesmo tipo de solo, porém de textura argilosa e média, Ausani (2010) atribuiu valores de 7 e 8 respectivamente. Já, Barreto (2006) atribuiu 7,2 e 6,9 para solos Litólicos independente da textura.

Os Argissolos Vermelho Amarelo, foram classificados como de textura Areia Franca. Mas Aller et. al (1987) não definiu índices para essa classe textural. Entretanto, analisando o triângulo de classificação textural da Embrapa (2006), observou-se que a mesma se encontra entre as classificações Areia e Franco Arenosa e essas duas classes recebem

índices *DRASTICS* de respectivamente 9 e 6. Nesse contexto, devido a maior aproximação da granulometria encontrada com a textura Franco Arenosa, atribuiu-se índice 7, para a Areia Franca.

Para os Argissolos atribuiu-se índice 5, o mesmo atribuído por Ausani (2010) para Argissolos Vermelho Distróficos abrupticos A de textura arenosa/média.

Os Neossolos Flúvicos foram classificados como Areia e a eles foi atribuído índice 9. Esse mesmo índice também foi atribuído por Barreto (2006) e Cutrim (2010), para Neossolos de mesma classificação textural.

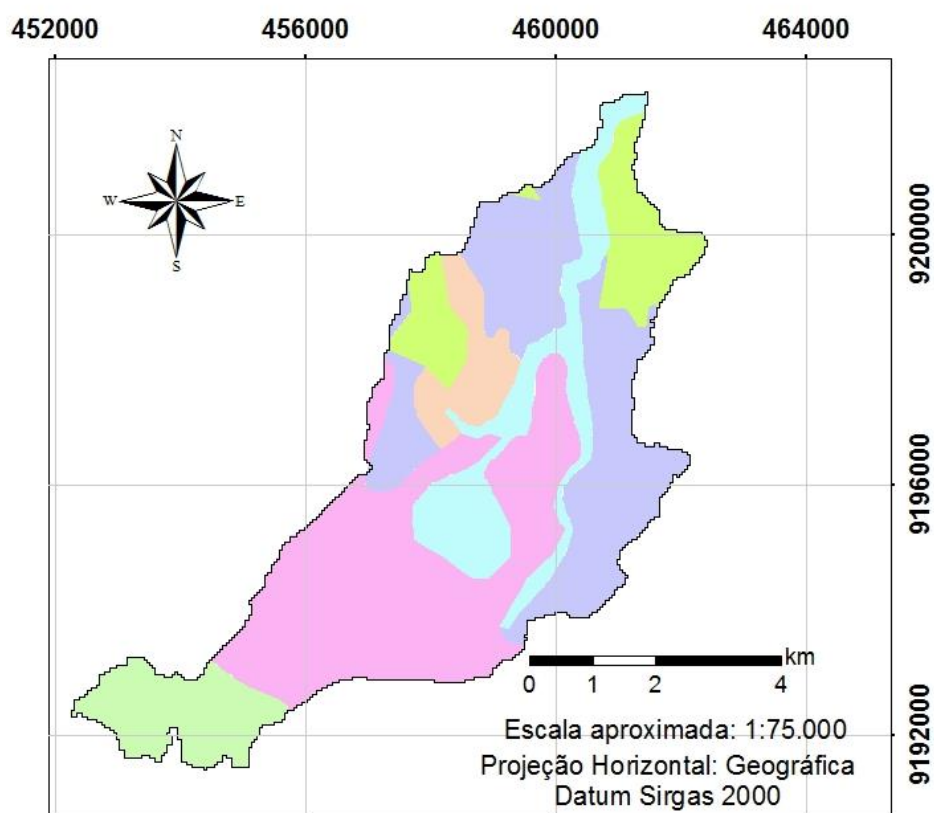
Os Latossolos Vermelho Amarelo, apresentaram classificação textural Franco Arenosa e a eles foi atribuído índice *DRASTIC S* igual a 6. Segundo Barreto (2010), como os Latossolos apresentam acentuada drenabilidade, os mesmos apresentam comportamento semelhante aos solos detextura Franco Arenosa. O índice atribuído no presente trabalho foi igual ao atribuído por Camporanga (2006), porém diferente do atribuído por Cutrim (2010), que foi igual a 7 para essa mesma classe textural.

Os Latossolos Amarelo apresentaram classificação textural Franco Siltoso e a eles atribuiu-se o índice igual a 4. Esse mesmo índice foi atribuído por Ausani (2010) e Camporanga (2006) para a mesma classe textural. Entretanto eles observaram esse índice pode mudar de acordo com o teor de areia.

A área classificada por FUNCEME (2006) como de urbanização, apresentou solos de classificação textural Areia Franca e a ela atribuiu-se índice igual a 7.

Os tipos de solos e a espacialização do índice *DRASTIC S* na BHSJ estão na Figura 33.

Figura 33 - Espacialização dos tipos de solos na BHSJ e os respectivos índices DRASTIC



Legenda

Tipos de Solos

Índice DRASTIC

	Argissolo Vermelho-Amarelo	7
	Latossolo Amarelo	4
	Latossolo Vermelho-Amarelo	6
	Neossolo Flúvico	9
	Neossolo Litólico	6
	Urbanizacao	7

Os tipos de solos e os respectivos percentuais da área ocupada na BHSJ estão na Tabela 19. Observa-se que a predominância dos Neossolos Litólicos, ocupando cerca de 32,29% da área e uma menor dos Latossolos Vermelho-Amarelo.

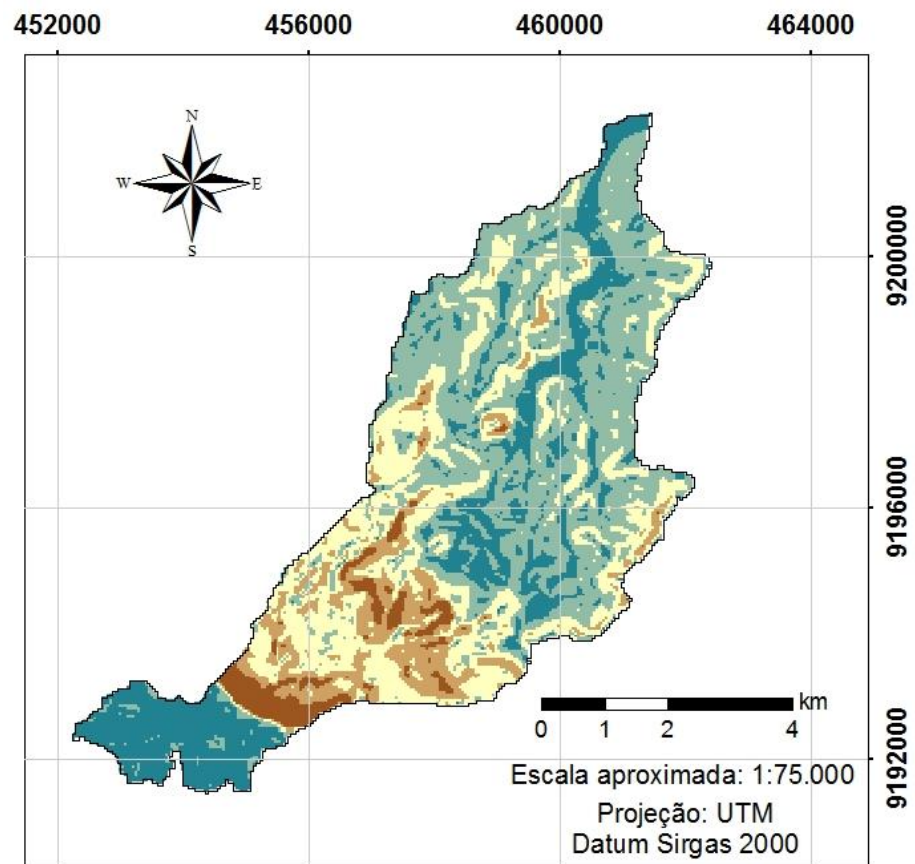
Tabela 19 - Tipos de solos encontrados na BHSJ e os respectivos percentuais de área

Tipo de Solo	% da Área
Latossolo Amarelo	9,04
Neossolo Litólico	32,29
Neossolo Flúvico	22,02
Latossolo Vermelho-Amarelo	4,95
Argissolo Vermelho -Amarelo	20,95
Urbanização	10,74

6.3.5 Topografia (T)

A Figura 34 mostra a espacialização na BHSJ dos cinco intervalos de declividades definidos por Aller et al. (1987) e os respectivos índices de avaliação.

Figura 34 - Espacialização das classes de declividade na BHSJ e os respectivos índices *DRASTIC*



Legenda

Declividade %	Índice DRASTIC
0 - 2	10
2 - 6	9
6 - 12	7
12 - 18	5
> 18	3

As áreas de menores declividades (0 - 2%) são as que mais estão susceptíveis à poluição, devido a não ocorrência de escoamento superficial, favorecendo a infiltração de contaminantes nos solos, deixando as mais vulneráveis. Devido estas características, o índice *DRASTIC* T é o mais elevado e igual a 10. De acordo com a Figura 34, estas áreas se encontram principalmente na Zona de Chapada e na Zona de Pediplano, próximo às aluviões.

As áreas de maiores declividades (>18%) são menos susceptíveis à poluição, devido a elevada ocorrência de escoamento superficial em direção às áreas mais planas, para essas áreas atribuiu-se índice igual a 3.

De acordo com a Tabela 20, o intervalo de declividade de 2 a 6 % foi o que representou maior área na BHSJ, correspondendo a 39,5% do total. Entretanto, a faixa de maior declividade (> 18%) foi a de menor representatividade, correspondendo a apenas 4,1 % da área.

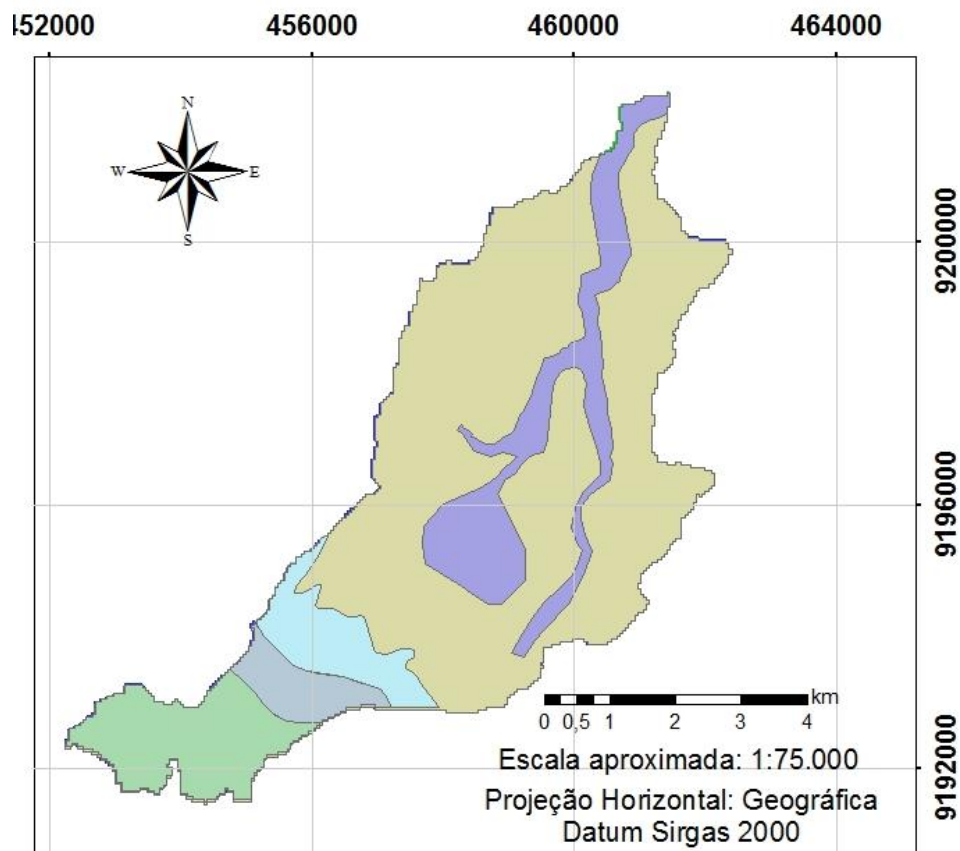
Tabela 20 - Intervalos de declividade na BHSJ e respectivas porcentagens de área

Topografia (%)	Área (%)
0 - 2	21,09
2 - 6	39,50
6 - 12	25,21
12 - 18	10,09
> 18	4,10

6.3.6 Impacto da zona vadosa (I)

A Figura 35 mostra a espacialização do índice *DRASTIC* I tendo como base o mapa geológico da BHSJ, pois a zona vadosa é constituída pelos mesmos matérias das formações geológicas aflorantes Exu, Arajara, Santana e Rio da Batateira, além da Aluvião.

Figura 35 - Espacialização da zona vadosa das formações geológicas encontradas na BHSJ e os respectivos índices *DRASTIC*



Legenda

Material da Zona Vadosa Índice *DRASTIC*

Formação

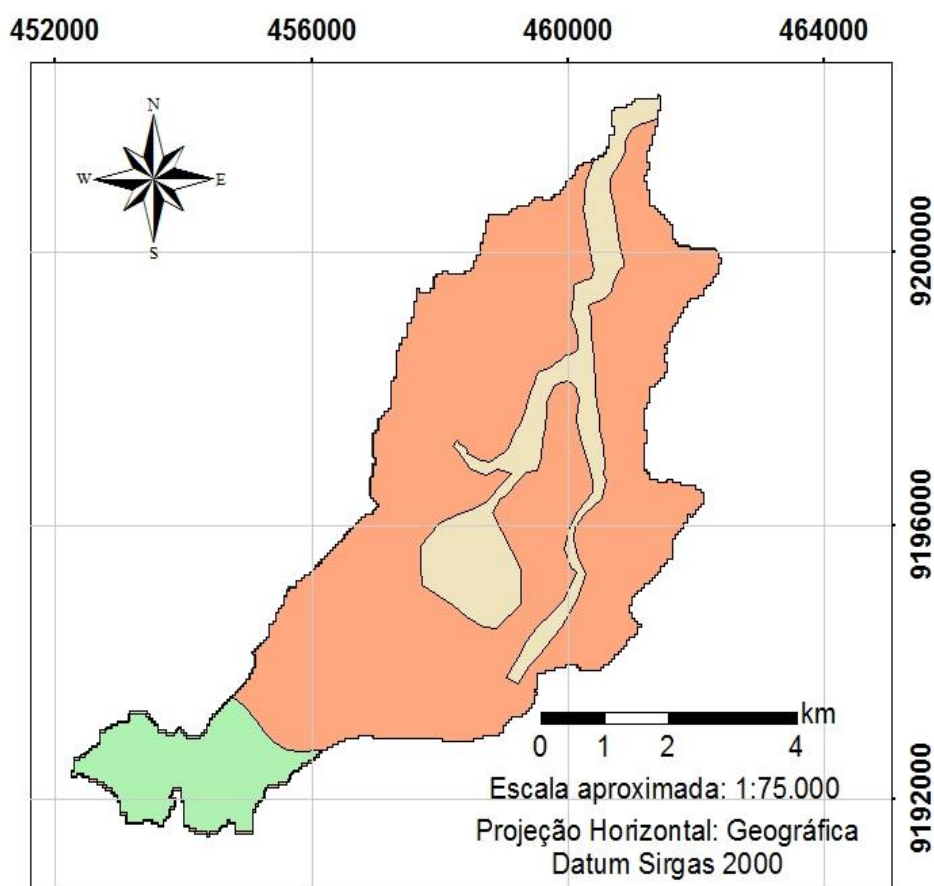
Exu	6
Aluvião	8
Arajara	6
Rio da Batateira	6
Santana	0

Às formações Exu, Arajara e Rio da Batateira, por serem constituídas de arenitos, foi atribuído o mesmo índice *DRASTIC* I igual a 6. Já a Formação Santana, por constituir-se um aquíclode, atribuiu-se índice zero. Para a formação aluvionar, constituída predominantemente de areia, atribuiu-se índice 8. Segundo Aller et al. (1987), para sedimentos constituídos de areia e cascalho esse índice pode variar de 6 a 9.

6.3.7 Condutividade hidráulica (C)

O valor médio da condutividade hidráulica do aquífero Rio da Batateira, obtido por Fontenele (2010), utilizando geoestatística, foi de $1,69 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ ou $1,46 \text{ m dia}^{-1}$; já para o aquífero Exu, o valor obtido por Mendonça (2001), através de ajustes no *MODFLOW*, foi de $1,35 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ ou $1,16 \text{ m dia}^{-1}$. Para a aluvião, o valor obtido no presente trabalho foi de $3,31 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$. Como todos os valores de condutividade hidráulica dos aquíferos da BHSJ foram menores que $8,1 \text{ m/dia}$, atribuiu-se para os mesmos o índice *DRASTIC* C igual (Figura 36).

Figura 36 - Espacialização do índice *DRASTIC* correspondente a condutividade hidráulica dos aquíferos da BHSJ



Legenda

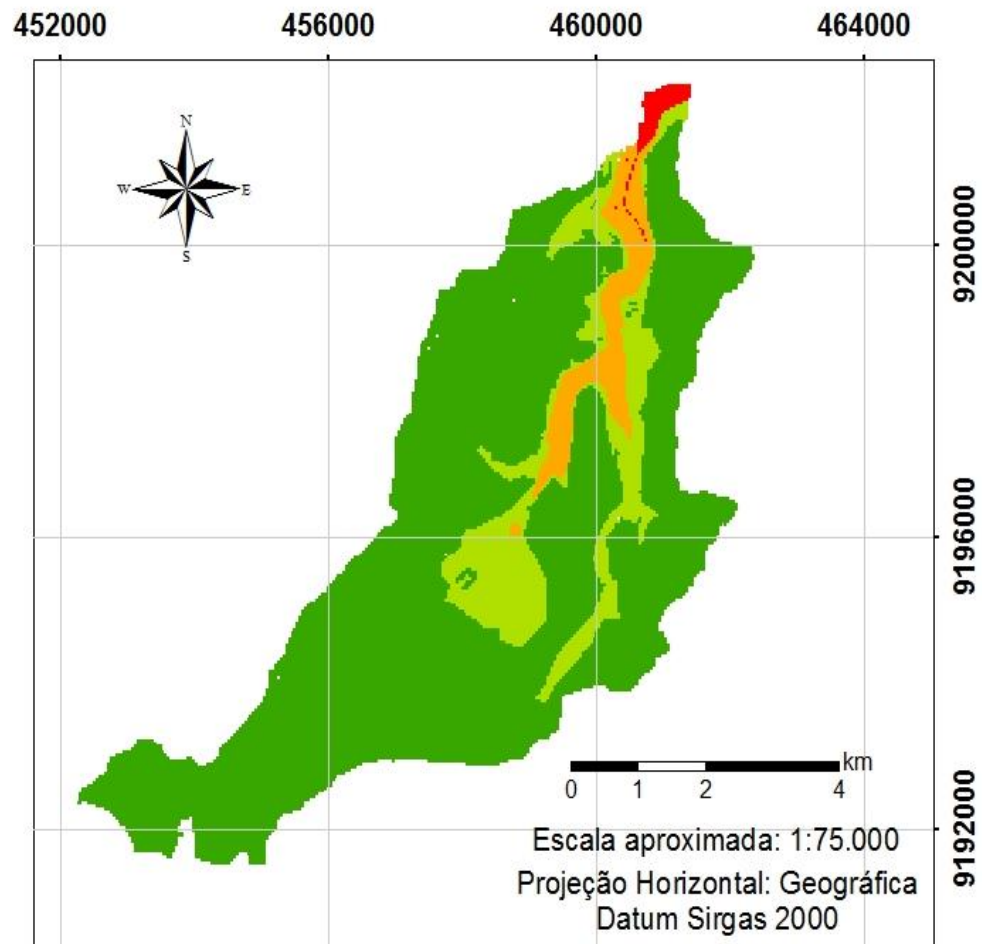
Condutividade m/dia Índice **DRASTIC**

	Aluvião	1
	Exu	1
	Rio da Batateira	1

6.3.8 Avaliação da vulnerabilidade a poluição

A Figura 37 mostra o mapa de vulnerabilidade à poluição dos aquíferos da BHSJ, obtidos a partir do método *DRASTIC*. Nela identificou-se quatro classes de vulnerabilidade: insignificante, muito baixa, baixa e moderada. Na Tabela 21 encontra-se as classes de vulnerabilidade definidas pelo método e os respectivos percentuais de áreas na BHSJ.

Figura 37 - Mapa de vulnerabilidade à poluição dos aquíferos da BHSJ obtido a partir do método *DRASTIC*



Legenda

Vulnerabilidade DRASTIC

 < 100	Insignificante
 101 - 119	Muito baixa
 120 - 139	Baixa
 140 - 159	Moderada

Tabela 21 - Classes de vulnerabilidade à poluição da BHSJ obtidas a partir do método *DRASTIC* e as respectivas áreas

Classes de vulnerabilidade	Intervalo de valores	% da Área
Insignificante	<100	78,13
Baixa	101 - 119	11,25
Muito Baixa	120 - 139	7,36
Moderada	140 - 159	3,26

Observa-se na Figura 38 que os aquíferos da Zona de Chapada foram classificados como de vulnerabilidade insignificante e na Zona de Pediplano, apresentaram as demais classificações.

A classe de vulnerabilidade insignificante foi a que teve uma maior representatividade, ocupando 78,13% da área da bacia. Os elevados valores de profundidade do nível estático contribuíram para diminuir a vulnerabilidade dessas áreas. A área de vulnerabilidade muito baixa corresponde a 11,25% e está presente nas marginais da aluvião. Essa mudança de classe deve-se ao aumento nos índices *DRASTIC* associados a profundidade do nível estático (D), material do aquífero (A), tipo de solo (S), declividade (T), impacto da zona vadosa (I) e condutividade hidráulica do aquífero (C).

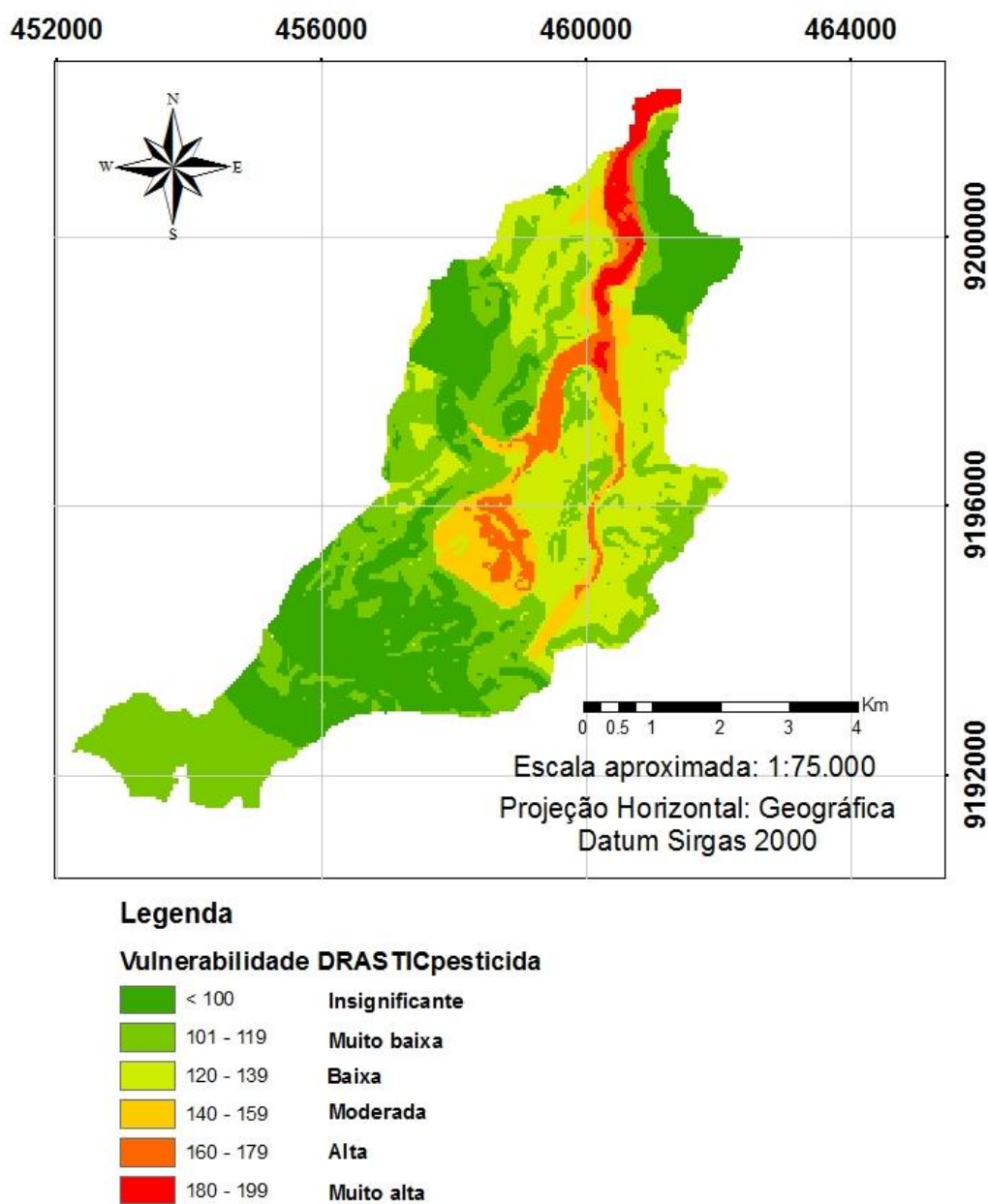
As áreas classificadas como de baixa e moderada vulnerabilidade correspondem a respectivamente 7,36 e 3,26 %. A área de moderada vulnerabilidade encontra-se na porção central da aluvião, próximo ao exutório, enquanto a de baixa, encontra-se também na porção central, mas a montante da primeira. Estas áreas são mais susceptíveis a poluição devido, principalmente, a menor profundidade do nível estático e as baixas declividades dessas áreas.

Analisando o mapa de vulnerabilidade feito por Tavares et al. (2009), utilizando a metodologia *GOD*, em uma área da região do Cariri cearense, observou-se a BHSJ com áreas classificadas como de alta e média vulnerabilidade. Essa discrepância entre os mapas resultantes deve-se a diferença entre as metodologias adotadas, sendo a *GOD* muito simplificada; além da diferença entre as escalas das áreas estudadas: Tavares et al. (2009) trabalhou em uma área de aproximadamente 2.230 km², enquanto a BHSJ possui apenas 41 km², sendo possível detalhar mais os parâmetros.

Ausani (2010) também comparou os resultados obtidos pelas metodologias *DRASTIC* e *GOD* e observou classes distintas apresentadas pelos dois métodos.

A Figura 38 mostra o mapa de vulnerabilidade à poluição dos aquíferos da BHSJ, obtidos a partir do *DRASTIC* pesticida. Com a presença de seis classes de vulnerabilidade: de vulnerabilidade: insignificante, muito baixa, baixa, moderada, alta e muito alta.

Figura 38 - Mapa de vulnerabilidade à poluição dos aquíferos da BHSJ obtido a partir do método *DRASTIC* pesticida



As áreas de vulnerabilidade insignificante foram encontradas nas Zonas de Talude e alguns locais da Zona de Pediplano, ela ocorre nas áreas de elevadas declividades, onde

também encontra-se o afloramento do aquífudo Santana. Essa classe de vulnerabilidade encontra-se em aproximadamente 21,15% da área da BHSJ (Tabela 22).

Tabela 22 - Classes de vulnerabilidade à poluição da BHSJ obtidas a partir do método *DRASTIC* pesticida e as respectivas áreas

Classes de vulnerabilidade	Intervalo de valores	% da Área
Insignificante	<100	21,15
Muito baixa	101 - 119	40,71
Baixa	120 - 139	22,97
Moderada	140 - 159	7,05
Alta	160 - 179	5,56
Muito alta	180 - 199	2,55

Observa-se na Tabela 22 que a área de vulnerabilidade muito baixa corresponde a aproximadamente 40,71% da BHSJ. Esta área localiza-se, principalmente, na Zona de Chapada, onde aflora o Sistema Aquífudo Superior e em algumas áreas na Zona de Pediplano. Na Zona de Chapada, apesar do nível estático encontrar-se à grandes profundidades (a cerca de 180 m, segundo Mendonça (2001)), os Latossolos Amarelos de boa permeabilidade (em torno de $3,6 \text{ cm min}^{-1}$, segundo Araújo (2010) e bastante plano (com declividades menores que 2%) contribuem com o aumento da vulnerabilidade local.

A classe de baixa vulnerabilidade é a segunda com maior representatividade na BHSJ, correspondendo a 22,97% da área, encontrando-se somente na Zona de Pediplano, próximas as áreas da aluvião. Nessas áreas a baixa declividade eleva a vulnerabilidade.

As áreas de aluvião que possuem os maiores valores de declividade e profundidade do nível estático são classificadas como de vulnerabilidade moderada, representando 7,05% da área.

As áreas marginais da aluvião, próximo ao exutório, e a porção central da aluvião, a montante das mesmas, apresentaram-se de alta vulnerabilidade e representam cerca de 5,56% da BHSJ. Essa elevação ocorre devido as baixas profundidade do nível estático e declividades da área, além das características intrínsecas a aluvião.

Já a porção central da aluvião, que vai do exutório até a localização à montante do mesmo, onde inicia a faixa perene do riacho São José, apresentou vulnerabilidade muito alta, por localizar-se onde ocorre o afloramento do nível freático. De acordo com a Tabela 22, essa área corresponde a aproximadamente 2,55% da BHSJ.

O mapeamento realizado pelo índice *DRASTIC* dividiu a bacia em apenas quatro classes de vulnerabilidade, sendo a de vulnerabilidade moderada a de maior susceptibilidade a poluição. O índice *DRASTIC* pesticida dividiu a bacia em seis classes de vulnerabilidade, sendo a de vulnerabilidade muito alta a de maior susceptibilidade. O mapeamento realizado pelo *DRASTIC* pesticida mostra a importância de se ter um controle das atividades agrícolas praticadas na BHSJ, visando a preservação das águas subterrâneas.

6.4 Planejamento agrícola dos solos da aluvião

Como a agricultura é a principal atividade antrópica na BHSJ, utilizou-se o mapa de vulnerabilidade à poluição dos aquíferos, obtido a partir do método *DRASTIC* pesticida, associado às disposições do novo Código Florestal (Lei 12.651) sobre a proteção de vegetação nativa, para a partir dos mesmos delimitar as áreas de APP objetivando o zoneamento ambiental da área.

Muitas áreas que foram classificadas pelo *DRASTIC* pesticidas como de alta e muito alta vulnerabilidade a poluição, são utilizadas para a agricultura e pecuária. Na Figura 39 observa-se algumas áreas próximas ao riacho que são utilizadas para atividades agrícolas.

Outras áreas da BHSJ, identificadas por Costa (2013) como de atividades agrícolas, encontram-se inseridas em áreas classificadas com uma moderada vulnerabilidade à poluição dos aquíferos (Figura 39).

Figura 39 - Delimitação das áreas classificadas como de alta (linhas laranjas) e muito alta (linhas vermelhas) vulnerabilidade à poluição dos aquíferos por pesticidas, com indicação dos locais de atividades agrícolas (quadros em destaque).

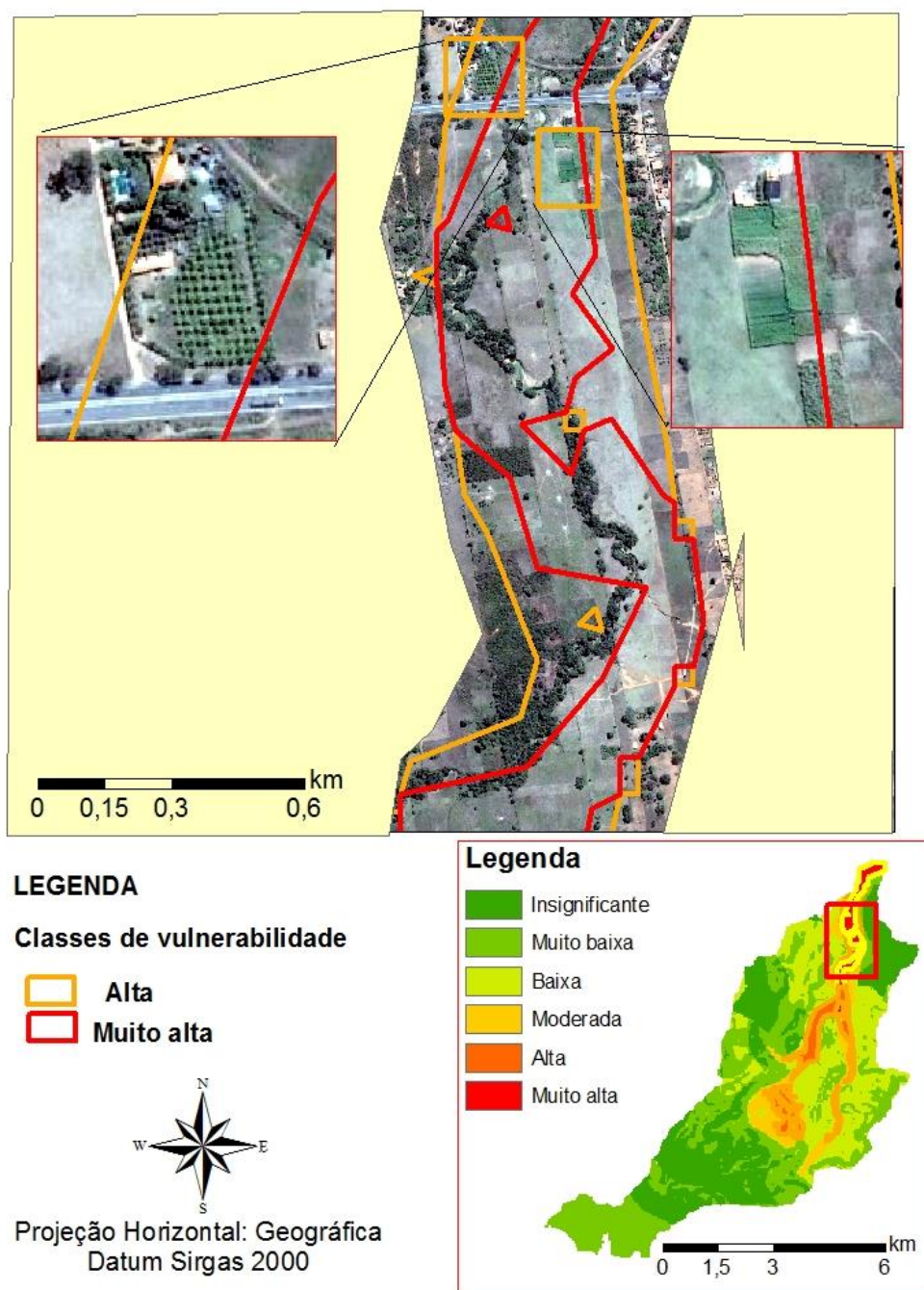
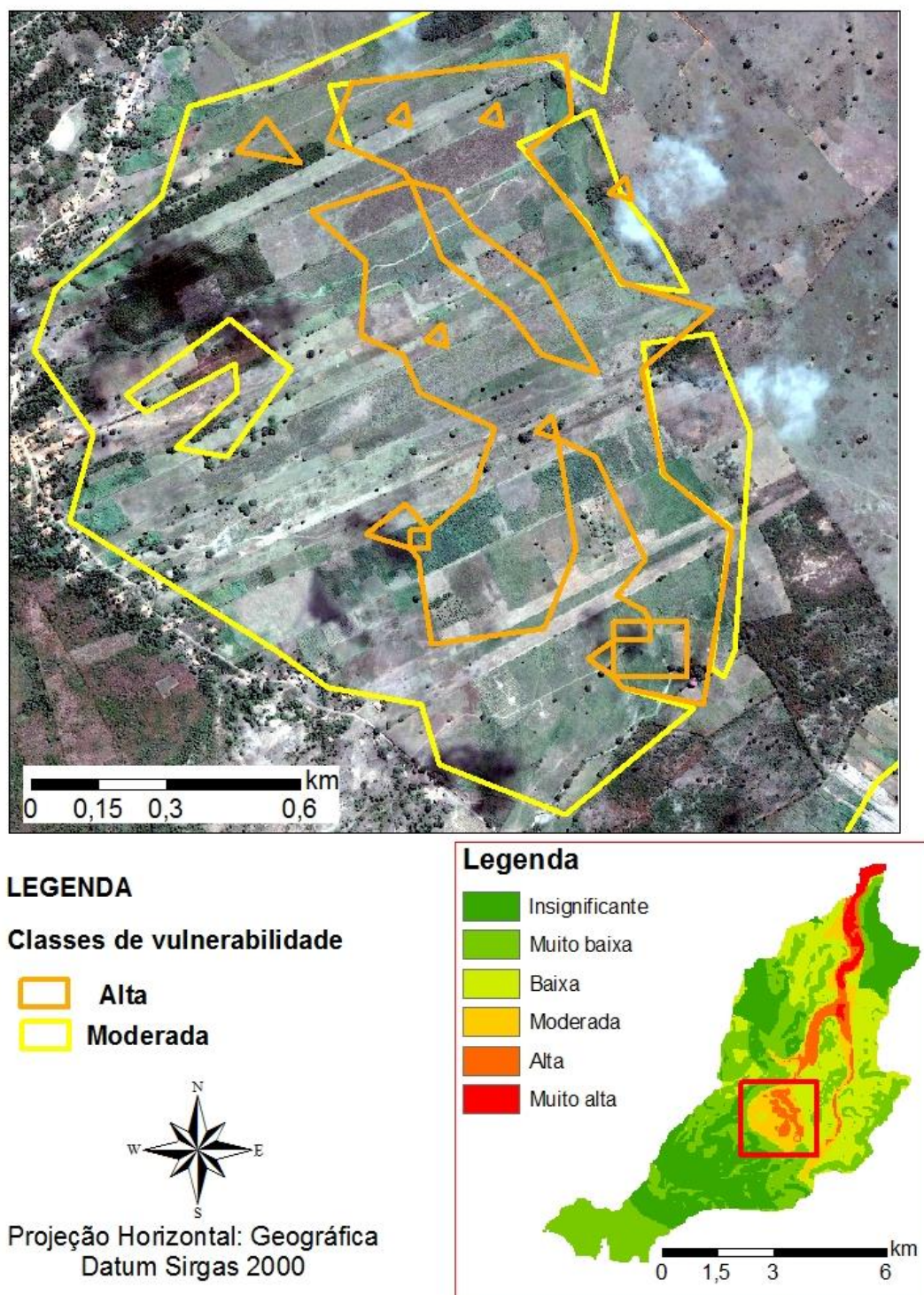


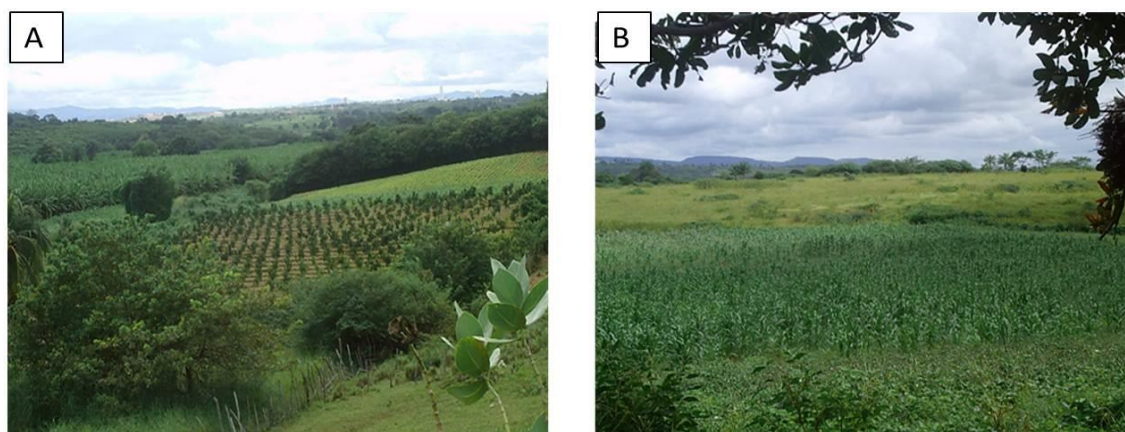
Figura 40 - Delimitação das áreas classificadas como de moderada (linhas verdes) e alta (linhas vermelhas) vulnerabilidade a poluição dos aquíferos por pesticidas



A Figura 40 mostra algumas dessas atividades, que são praticadas dentro das áreas classificadas como de moderada e de alta vulnerabilidade à poluição dos aquíferos por

pesticidas. Nela observa-se, como exemplo, uma área de agricultura irrigada (Figura 41 A) e outra de sequeiro (Figura 41 B).

Figura 41 - Área de agricultura irrigada (A) e de sequeiro (B) identificadas nas áreas classificadas como de moderada e alta vulnerabilidade a poluição dos aquíferos por pesticidas na BHSJ

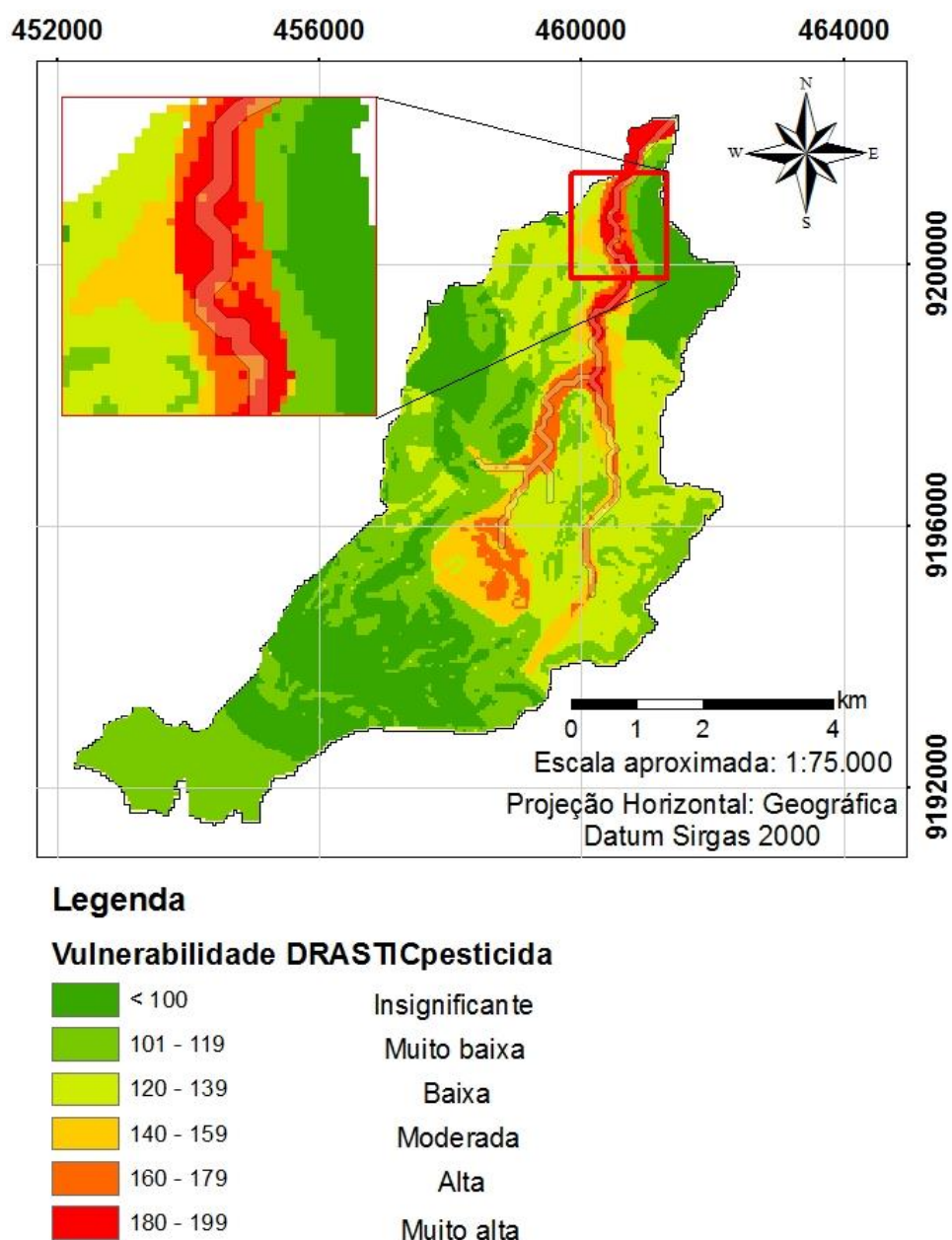


No zoneamento, as Áreas de Preservação Permanente (APP) do riacho São José devem ter um destaque especial, pois são de fundamental importância na preservação dos recursos hídricos, tanto subterrâneos quanto superficiais. A vegetação que deve ser preservada nessas áreas funciona como um filtro para os sedimentos que são transportados em direção ao riacho, evitando assim o assoreamento, além de contribuir como uma área de recarga eficiente dos aquíferos. A recarga nessas áreas é facilitada pelos bioporos produzidos pelas raízes das plantas e pela macrofauna edáfica (Araújo, 2010).

Considerando a largura do canal principal do riacho São José entre 10 e 50 m, de acordo com o novo Código Florestal (Lei 12.651), que dispõe sobre a proteção de vegetação nativa, a área de proteção permanente ao longo do mesmo deverá ser de 50 m.

Na Figura 42 estão mostradas as APPs (amarelo com transparência) e as classes de vulnerabilidade determinadas pelo *DRASTIC* pesticida. De acordo com o quadro em destaque, as áreas classificadas como de muito alta vulnerabilidade a poluição, não são totalmente englobadas pelas APPs, no entanto é necessário um ordenamento do uso e ocupação dos solos além das APPs.

Figura 42 - Áreas de Preservação Permanente do riacho São José e classes de vulnerabilidade a poluição dos aquíferos obtidas pelo índice *DRASTIC* pesticida.



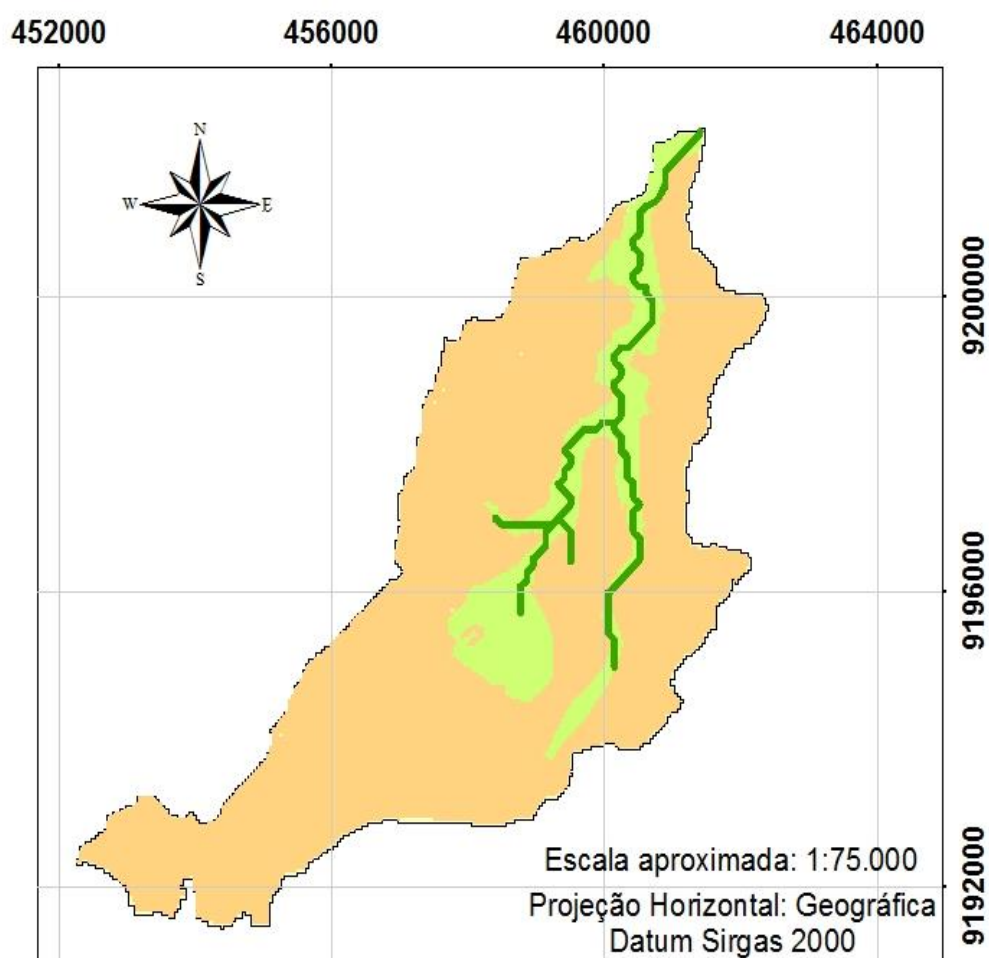
Com o planejamento agrícola dos solos da aluvião, as áreas classificadas como sendo de APP de rio, terão que ser preservadas, não podendo ser desenvolvidas atividades agrícolas. Além disso, em alguns locais é necessária a recuperação da mata ciliar.

As áreas classificadas pelo *DRASTIC* pesticida como de alta, muito alta e moderada vulnerabilidade a poluição dos aquíferos, que vão bem além dos limites das APPs do riacho São José, não poderão ter atividades agrícolas potencialmente poluidoras, devendo ser implantado um sistema de agricultura orgânica.

Nas demais áreas que foram classificadas como sendo de baixa, muito baixa e insignificante vulnerabilidade, deverão ter o uso de pesticidas monitorado, pois apesar de serem pouco vulneráveis a poluição os pesticidas podem atingir áreas mais vulneráveis através do escoamento superficial.

A Figura 43 mostra o zoneamento agrícola da BHSJ como proposta quanto ao uso de pesticidas.

Figura 43 - Zoneamento agrícola da BHSJ quanto ao uso de pesticidas.



Legenda

Zoneamento da BHSJ

- APPs do riacho
- Agricultura orgânica
- Áreas com o uso de pesticidas monitorado

7 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos no presente estudo conclui-se que:

- Áreas de bacias contributivas de sedimentos a montante superiores a 1.000.000 m² e declividades médias das mesmas superiores a 5%, são condições restritivas à formação da aluvião na BHSJ;
- Dentre os seis métodos utilizados no mapeamento automático das áreas de aluvião da BHSJ, o melhor resultado foi obtido pelo que considera a largura do *buffer* como uma função logarítmica da área da bacia contributiva de sedimentos a montante. A área da aluvião obtida por esse método, considerando as condições restritivas, corresponde a 12% da área da BHSJ, enquanto a área “real”, obtida por sondagens e interpretação de imagens de satélites, é de 14%. Além do mais, os contornos gerados por esse método ficou quase que em concordância com a delimitação “real”. Esse método de mapeamento pode ser empregado em áreas com poucos dados sobre a aluvião, utilizando informações de fácil obtenção.
- A aluvião da BHSJ, numa faixa de aproximadamente 1000 m, onde o riacho é perene, apresentou textura média e arenosa em respectivamente 69 e 22% do perfil, porosidade efetiva média de 8,3%, profundidade máxima de 20 m e capacidade de armazenamento de aproximadamente 498.000 m³.
- A partir do índice *DRASTIC*, a BHSJ é dividida em quatro classes de vulnerabilidade à poluição dos aquíferos: insignificante, muito baixa, baixa e moderada. Nesse contexto, cerca de 78% da área foi classificada como de vulnerabilidade insignificante, com risco potencial de contaminação reduzido; e apenas cerca de 3% da área, que corresponde a porção da aluvião onde o riacho é perene, foi classificada como de vulnerabilidade moderada, por estar mais susceptível a contaminação, sendo, portanto, necessário um maior controle no uso e ocupação do solo.
- Como agricultura é uma das principais ações antrópica verificada na BHSJ, utilizou-se também o índice *DRASTIC* pesticida para auxiliar no planejamento do uso e ocupação dos solos da área. A partir desse índice, a BHSJ foi dividida em seis classes de

vulnerabilidade à poluição dos aquíferos por pesticida: insignificante, muito baixa, baixa, moderada, alta e muito alta. Nesse contexto, cerca de 41% da área foi classificada como de vulnerabilidade muito baixa. Já as áreas classificadas como de vulnerabilidade moderada, alta e muito alta correspondem a 7, 6 e 3% respectivamente. Essas três áreas compõem toda a aluvião e nelas são importantes adoções de medidas que visem o controle do uso de pesticidas.

- A partir do mapa de vulnerabilidade à poluição dos aquíferos da BHSJ associado a delimitação das áreas de APP de rio, obteve-se o zoneamento agrícola da área quanto ao uso de pesticidas, servindo de base para o planejamento do uso agrícola da área. Nesse contexto, a bacia foi dividida em três zonas: a de APPs do riacho, a de agricultura orgânica e as de uso controlado de pesticidas.
- O uso das metodologias empregadas no trabalho aliado ao uso de SIG, se mostraram como uma ferramenta bastante útil para o planejamento do uso e ocupação dos solos, visando a proteção dos recursos hídricos subterrâneos da BHSJ.

8 RECOMENDAÇÕES:

- Testar o método de mapeamento automático das aluviões em outras áreas sedimentares, calibrando os devidos parâmetros.
- Utilizar técnicas de geofísica caracterizar a aluvião da BHSJ tridimensionalmente.
- Analisar a qualidade das águas subterrâneas nas áreas mapeadas pelo índice *DRASTIC* pesticida, para verificar se as áreas de maior susceptibilidade a poluição estão poluídas por pesticidas.

REFERÊNCIAS

ACEP. **Tecnologias agrícolas e de conservação ambiental para o topo da Chapada do Araripe**. Fortaleza: FINEP-BNB, 1999.

ALENCAR, A. L.; SILVA, M. A. P.; BARROS, L. M. Florística e Fitossociologia de uma área de Cerradão na Chapada do Araripe – Crato/CE. **Revista Brasileira de Biociências**. Porto Alegre, v. 5, n. 2, p. 18-20. Jun. 2007.

ALLER, L.; BENNETT, T.; LEHER, J.H.; PETTY, R.J. (1987). DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. **US EPA Report** 600/2 – 85/018 Ada, Oklahoma.

ARAÚJO, A. O. **Avaliação de propriedades físicas dos solos e da macrofauna edáfica em áreas submetidas a manejo florestal de vegetação nativa na chapada do Araripe**. 2010. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Centro de Ciências Agrárias. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

ALMEIDA J. R. **Planejamento ambiental: caminho para a participação popular e gestão para nosso futuro comum: uma necessidade, um desafio**. Rio de Janeiro, Thex Ed., 1993. 176 p.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Ministério do Meio Ambiente. **Panorama da qualidade das águas subterrâneas no Brasil**. Cadernos de recursos hídricos. ZOBY, J. L. G.; OLIVEIRA de, F. R. (eq. técnica). Brasília, 2005. 74 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Informação e documentação: referências: elaboração. Rio de Janeiro, 1984.

AUSANI G. M. **Uso da terra e caracterização hidropedológica na região de vila Kramer, São Francisco de Assis – RS**. 2010. 131 f. Tese (Doutorado em Ciências do Solo – Área de concentração em Processos Físicos e Morfogenéticos do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) – Santa Maria - RS.

BABIKER, I. S.; MOHAMED, M. A. A.; HIYAMA, T.; KATO, K. A. GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, central Japan. **Science of the Total Environment**, v. 345, p. 127– 140, 2005.

BARRETO, F.M.S. **Contaminação da água subterrânea por pesticidas e nitrato no município de Tianguá, Ceará**. 2006. 183f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil – Área de concentração em Saneamento Ambiental) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

BRASIL. Lei Nº 12.65, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da mata nativa. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília. Disponível em < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12651.htm > Acesso em: 21 mar. 2013.

BORDAS, M.P.; SEMMELMANN, F.R. Elementos de Engenharia de Sedimentos. In:

TUCCI, C.M.R. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: ABRH, 2001. p.915 – 943.

BURROUGH, P.A. **Principles of geographical information systems for land resources**. assessment. Oxford: Clarendon Press, 1987. 193p..

BURTE, J. D. P. **Os pequenos aquíferos aluviais nas áreas cristalinas semiáridas: Funcionamento e estratégias de gestão**. 2008. 191f. Tese (Doutorado em Eng. Civil) – Universidade Federal do Ceará – Fortaleza-2008.

CALMANT, S.; SEYLER, F., 2006. Continental surface waters from satellite altimetry. **Comptes Rendus Geoscience**, 338, 1113-1122.

CAMARA, G.; FELGUEIRAS, C. A. **Modelagem Numérica de Terreno**. Disponível em<<http://mtcm12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2004/04.22.07.43/doc/publicacao.pdf>>. Acesso em 3 de maio de 2012.

CAMARA, G.; QUEIROZ, C. **Arquitetura de sistema de informação geográfica**. Disponível em < <http://mtcm12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2004/04.22.07.43/doc/publicacao.pdf> >. Acesso em 21 de mar. 2012.

CAMPORONGA I. **Vulnerabilidade natural no sistema aquífero guarani e análise de parâmetros físico-químicos das águas Subterrâneas**. 2006. 110 p. Dissertação (Mestrado em Geografia e Geociências) – Universidade Federal de Santa Maria – Santa Maria.

CARVALHO T. R. A.; MASSARANDUBA W. M.; FONTENELLE S. B.; BARRETO A. C. MENDONÇA L. A. R. **Análise morfométrica da microbacia do rio Granjeiro, Crato-CE**. 2012. IV Encontro Universitário da UFC no Cariri. Juazeiro do Norte – CE.

CEARÁ. **Implantação do sistema de monitoramento/gestão de uma área piloto do aquífero Missão Velha, na Bacia Sedimentar do Araripe**. Relatório final do projeto. Fortaleza, 2005.

CIVITTA, M. **La carte della vulnerabilità deli aquiferi all'inquinamento: teoria e pratica**. Bologna: Pitagora Editrice, 1994, 325p

COSTA, W. D. **Estudo Hidrogeológico de Recife, Olinda, Camaragibe e Jaboatão dos Guararapes** – Projeto HIDROREC II. Secretaria de Recursos Hídricos, Governo do Estado de Pernambuco/ANA, Proágua, 2002, Recife, PE.

COSTA K. V. M. **Parâmetros Hidrosedimentológicos da Bacia Hidrográfica do São José, no Cariri Cearense**. 2013. 104 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Centro de Ciências Agrárias. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

CPRM 1998. **Programa de água subterrânea para a região do Nordeste projeto aluviões e coberturas recentes do Nordeste Oriental**. V. 22 1998 Recife.

CURIE, F.; GAILLARD, S.; DUCHARNE, A., BENDJOUDI, H., 2007. Geomorphological methods to characterise wetlands at the scale of the Seine watershed. **Science of the Total Environment**, 375, 59-68.

CUTRIM, A. O.; CAMPOS, J. E. G. Aplicação dos Métodos Drastic e Posh para a Determinação da Vulnerabilidade e Perigo à Contaminação do Aquífero Furnas na Cidade de Rondonópolis-MT. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Mato Grosso, p. 127-142. Abr/Jun. 2010.

DALY-ERRAYA, G., 2007. **Délimitation des aquifères superficiels dans le Nordeste brésilien**. Quixeramobim-CE. IUT CAen, Montpellier, pp. 38.

DAVIS, S. N.; DeWIEST, R. **Hydrogeology**. John Willey & Sons, 1966. 463p.

DNPM. 1996. **Projeto avaliação hidrogeológica da Bacia Sedimentar do Araripe**. Programa nacional de estudos dos distritos mineiros. Recife, Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), distritos regionais Pernambuco e Ceará, 101 p.

EASTMAN, J. (1999). Multi-criteria evaluation and GIS; in Geographical Information System; LONGLEY, P.; New York; John Wiley & Sons. pp.493-502.

EMBRAPA. Gestão territorial. **Software para avaliação de risco ambiental**. Disponível em: < <http://www.sgte.embrapa.br/destaques/20130207Araqua.html> >. Acesso em: 20 nov. 2012.

FAO. 1999. **Sistema de Información Geográfica para un Desarrollo Sostenible** – Aspectos Técnicos del SIG. Disponível em: < <http://www.fao.org> >. Acesso em: 20 abr. 2012.

FELGUEIRAS, C. A. 1999. **Modelagem Numérica de Terreno**. Geoprocessamento Teoria e Aplicações. Livro on line, editado e organizado por: Câmara, G.; Davis, C.; Monteiro, A. M. V.; Paiva, J. A. C.; DÁlge, J. C. L. Disponível em: < <http://www.dpi.inpe.br> >. Acesso em: 11 abr. 2012.

FERREIRA L. M. R.; DANTAS M. G. F.; ODA G. H.; IRITANI M. A. E CASARINI D. C. P. Mapeamento da vulnerabilidade e risco de poluição das águas subterrâneas na região metropolitana de campinas, SP. **Anais... XI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas** (2000).

FONTENELE, S. de B. **Modelagem matemática da dinâmica de fluxo riacho-aquífero na microbacia hidrográfica do riacho são José, região do cariri cearense**. 2010. 100 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Centro de Ciências Agrárias. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

FOSTER, S.S.D. & HIRATA, R.C.A. 1988. Groundwater pollution risk evaluation: the methodology using available data. CEPIS/PAHO/WHO. Lima, Peru. 78 p.

FUNCEME. **Avaliação de perdas de água em trânsito em rios perenizados do semi-árido** – volume I. Fortaleza, 2002. 227 p.

GASPAR, S. M. F. S. NUNES, G. S. PINHEIRO, C. U.B. JÚNIOR, O. P. A. Avaliação de risco de pesticidas aplicados no município de Arari, Maranhão, Brasil: Base para programa de controle ambiental do rio mearim. **Revista de eco toxicologia e meio ambiente**. Curitiba, v. 15, p. 43-54, jan/dez. 2005.

GODIN, L., 1986. Identification d'un aquifère alluvial du littoral méditerranéen: la plaine de Mauguio (Hérault - France): étude des variations d'épaisseur de l'aquifère par sondages électriques. **Water Resources**. Univ. Montpellier 2, Montpellier.

GROHMANN, C.H., Riccomini, C., Alves, F.M., 2007. SRTM-based morphotectonic analysis of the Pocos de Caldas alkaline Massif, southeastern Brazil. **Computers & Geosciences**, 33, 10-19.

HIDALGO P. **Proposta metodológica de planejamento ambiental**. Porto Alegre, Apostila do curso de manejo conservacionista de bacias hidrográficas, 1991.

HVORSLEV, M. J. (1951). Time lag and soil permeability in ground-water observations. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station bulletin, v. 36. p. 221 – 250.

INMET. **Normais climatológicas, 1961 – 1990**. Brasília: 1993.

IPECE – Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará, **Perfil Básico Municipal**. Disponível em <<http://www.ipece.ce.gov.br>> Acesso: Março/2012.

IPLANCE - Fundação Instituto de Planejamento do Ceará. 1997. **Atlas do Ceará**. Governo do Estado do Ceará, Secretaria do Planejamento e Coordenação - SEPLAN. 65p.

JENSEN, John R. **Introductory Digital Image Processing - A Remote Sensing Perspective**. Prentice-Hall, USA, New Jersey, 1986.

LEITÃO, T. E.; FERREIRA, J. P. L.; OLIVEIRA, M. M.; MOINANTE, M. J. Poluição de águas subterrâneas: principais problemas, processos de prevenção e de reabilitação. In: simpósio de hidráulica e recursos hídricos dos países de língua oficial portuguesa, 6., 2003, Cabo Verde. **Proceedings...**Cabo Verde. 2003. p. 78-81.

LEITE, C. E. S.; ANDRADE, F. C. M.; MOBUS, G. E SOUZA, N. P. R. **Modelagem geométrica de um trecho aluvionar do Rio Palhano na comunidade do chile, no limite dos municípios de Morada Nova e Ibicuitinga –CE**. Fortaleza. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. 1999.

LE GRAND, H., 1964. System for evaluating contamination potential for some waste sites. **American Water Work Association Journal**. V.56 (8): 959-974.

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil. (2002) Departamento de Hidráulica. Grupo de Investigação de Águas Subterrâneas. **Relatório de cartografia da vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas do Concelho de Montemor-O-Novo utilizando o método DRASTIC**. Lisboa. 53 p.

MENDONÇA, L. A. R. **Recursos hídricos na chapada do Araripe**. 2001. 217f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará – 2001.

MOBUS, G.; ANDRADE, F C. M.; E LEITE, C. E. S. Estimativa do potencial hidrogeológico de barragens subterrânea – um estudo de caso. In: V Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos países de Língua oficial Portuguesa – XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Aracaju. 2001.

NASS D. P. O Conceito de Poluição. **Revista Eletrônica de Ciências**. São Carlos – SP, n. 15, Nov. 2002. Disponível em: < http://www.cdcc.usp.br/ciencia/artigos/art_13/poluicao.html > Acesso em: 18 jan. 2013.

NISHIDA, W. **Uma rede neural artificial para classificação de imagens multiespectrais de Sensoriamento Remoto**. 1998. Dissertação (Mestre em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina.

OLIVEIRA, F. A. J. **Uso de técnicas de sensoriamento remoto e sig para mapeamento dos aluviões em zona semi-áridas através de métodos de classificação automática**. 2006. 139p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

PAIVA, J.B.D.; CHAUDHRY, F.H.; REIS, L.F.R. **Monitoramento de bacias hidrográficas e processamento de dados**. São Carlos: RiMa, v.1, 2004. 326p.

PARALTA, E. A.; FRANCÉS, A. P. Caracterização hidrogeológica e avaliação da vulnerabilidade à poluição do complexo gabro-diorítico de Serpa-Brnches. Geonovas, **Revista da Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos**, Porto, v. 14, p. 82-83, 2000.

PARK, J.H., LEE, J.H., KANG, S.Y., KIM, S.Y., 2007. Hydroclimatic controls on dissolved organic matter characteristics and implications for trace metal transport in Hwangryong River Watershed, Korea during a summer monsoon period. **Hydrological Processes** 21, 3025–3034.

PINCINATO, F. L. Sensoriamento remoto e SIG na análise de viabilidade de recuperação de áreas de preservação permanente irregulares em São Sebastião - SP. In: SÍMPOSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12, 2005, Goiânia. **Anais eletrônicos**. Goiânia: INPE, 2005. Disponível em: < <http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.16.16.57/doc/2323.pdf> > p. 2323 - 2330. Acesso em : 06 de março de 2012.

RAMALHO FILHO, A., BEEK, K.J., 1995. **Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras**. 3. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, Brasil, pp. 1–65.

ROBINS, N.S.; CHILTON, P.J.; COBBING, J.E. Adapting existing experience with aquifer vulnerability and groundwater protection for Africa. **Journal of African Earth Sciences** 47, 2007. p. 30 - 38.

SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DO CEARÁ (SRH) – CE. **Atualização do Plano Estadual de Recursos Hídricos do Ceará** – PERH-CE. Fortaleza, 2005. 1 CD ROM.

SONG J., CHEN X., CHENG C., WANG D. & WANG W., Variability of streambed vertical hydraulic conductivity with depth along the Elkhorn River, Nebraska, USA. **Chinese Sci Bull.** V. 55, n.10, p. 992-999, April, 2009.

SWAIN, P. H., AND DAVIS, S. M., 1978, *Remote Sensing: The Quantitative Approach* New York: McGraw-Hill.

TAVARES, P. R. L.; CASTRO, M. A. H.; COSTA, C. T. F.; SILVEIRA, J. G. P.; JÚNIOR, F. J. A. **Mapeamento da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas localizadas na Bacia Sedimentar do Araripe, Estado do Ceará, Brasil.** *Revista Escola de Minas.* Ouro Preto, p. 227-236. Abr. 2009.

TEIXEIRA, M. B. **Planejamento ambiental: referencial básico e roteiro para formulação do Plano Ambiental Municipal.** Dissertação (Mestrado em Ecologia) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

TONELLO, K. C.; DIAS, H. C. T.; SOUZA, A. L.; ALVARES, C. A.; RIBEIRO, S.; LEITE, F. P. Morfometria da Bacia Hidrográfica da Cachoeira das Pombas, Guanhães – MG. **Revista Árvore**, v.30, n.5, p.849-857, 2006.

VIANA, N. O. **Vulnerabilidade e risco à poluição do sistema aquífero médio – entre Crato e Missão Velha, bacia do Araripe, Ceará.** 2007. 132p. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

YAGUE, A. G. 1983. Prospección Geofísica Aplicada a la Hidrogeología. In: CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M.R. (Org.). **Hidrologia Subterránea.** Barcelona: Omega. p. 1393-1430.